técnica

373 associação dos estudantes do instituto superior técnico
dezembro 1967 revista de engenharia

VARÕES DE AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA PARA BETÃO ARMADO TIPO A. 40
(«Heliaço» e «SNT 40»)

TENSÕES DE SEGURANÇA
Ra = 2400 kg/cm²
e
Ra = 4000 kg/cm² (SISMOS)

Literatura e Tabelas de Cálculo fornecidas gratuitamente

HELIAÇO, LDA.

R. DE S. JULIÃO, 41, 4.º D. — LISBOA

Tel.: 36 78 17 - 32 37 06 - 36 94 77

Fenner

REDUTORES DE VELOCIDADE

TIPO «PONTA DE VEIO»

mais de cem anos de progresso dos maiores fabricantes ingleses

REPRESENTANTES EXCLUSIVOS:

AUTO-LUSITANIA
ALFREDO DUARTE L.da
AV. DA LIBERDADE 73-77 LISBOA

confiança para a construção com

materiais novobra

pavimentos
em betão pré-esforçado
(homologados pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil)

SOCIEDADE DE PRÉ-FABRICAÇÃO E OBRAS GERAIS NOVOBRA, LDA.
AV. EST. UNIDOS DA AMÉRICA, 100 - 5.º D.º - TEL. 774832 / 771603 - LISBOA 5

CIMENTO SECIL

Fábrica:
Outão — Setúbal
Telef. 228824/5

Escritório:
R. do Comércio, 56-3.º
LISBOA 2
Telef. 328201/2/3

técnica

NUMERO 373 DEZEMBRO DE 1967 ANO XLII VOLUME XXX PUBLICAÇÃO MENSAL

Director
Vítor M. M. Pinto

Administrador
Vítor Coias e Silva

Redactores
A. J. Tavares Pires
J. C. Alves da Silva
João M. Pereira

Editor e Proprietário
Associação dos Estudantes
do Instituto Superior Técnico

Redacção e Administração
Avenida Rovisco Pais
Telefone 77 54 49
Lisboa 1

Assinaturas

		5 N.os	10 N.os
Continente e Ilhas	—	70$00	130$00
Ultramar, Brasil e Espanha	—	80$00	140$00
Estrangeiro	—	90$00	150$00

Número avulso — 20$00

Não se publica em Agosto e Setembro.

Os artigos assinados são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Composto e impresso na Tipografia Jorge Fernandes, Lda. — Rua da Cruz dos Poiais 108 — Lisboa

SUMÁRIO

125 *E. GUDEFIN, J. M. KAUFFMANN* e *C. HUMBERT* — **Generatrice a semi-conducteurs**
Semi-conductor generator

131 *REBELLO DA SILVA* — **Contribuição para a interpretação do método gráfico utilizado no estudo do golpe de ariete**
Contribution to the interpretation of the graphic method used in the study of the Water Hammer

141 *FERRY BORGES* e *ARTUR RAVARA* — **Estudo do comportamento de estruturas de edifícios sob acção de forças horizontais**
Study of the behaviour of frames acted by horizontal forces

157 *FERNANDO ALEXANDRE* — **Equações de excitação de biestáveis**
Excitation equations of flip-flops

163 *M. OLINDA BRAGA* e *ANTERA DE SEABRA* — **Características físico-químicas e tecnológicas de argilas utilizadas na indústria cerâmica nacional** — Physicochemical and technologic characteristics of clay used in the Portuguese ceramic industry

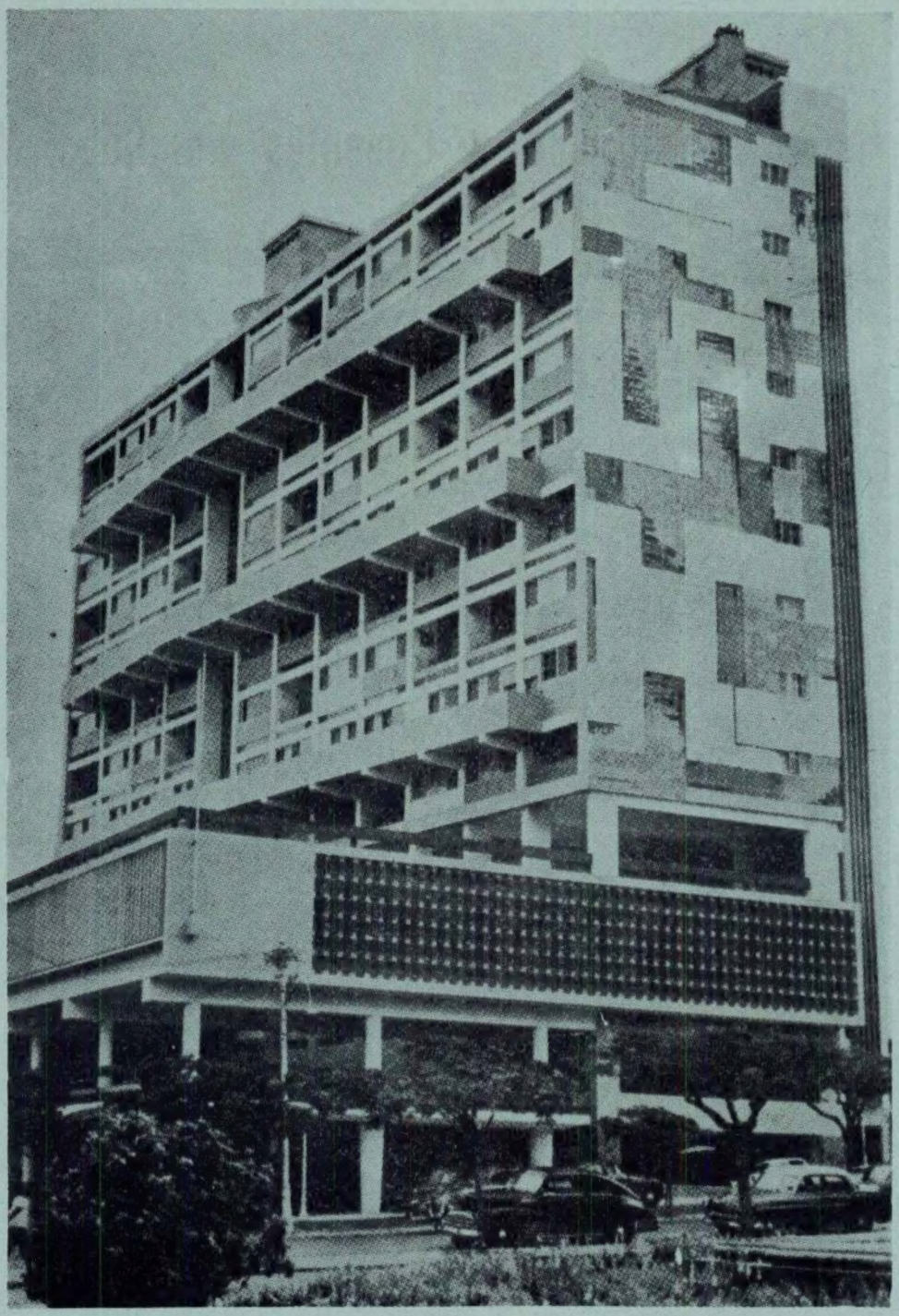
156 **Notas Informativas**
Elementos sobre a produção e o consumo de energia na rede eléctrica nacional

191 **Bibliografia**

CAPA: Vista de conjunto da Central Termoeléctrica do Carregado — Chaminé com 100 m de altura, reservatórios de fuel e canais do circuito de refrigeração — Construções Técnicas, Lda.

ÍNDICE ALFABÉTICO DOS ANUNCIANTES

	Pág.
A. Johnson & Co (Portugal), Ltd.	XXX
Aguiar e Melo, Lda.	XXIX
Asea Eléctrica	V e VII
Auto-Lusitânia	2.ª da capa
Cimento Secil	2.ª da capa
Companhia de Cimentos Brancos	VIII
Construções Técnicas	XXIII
Dial	XXVI
Electro-Arco, Ltd.ª	IV
Empresa de Cimentos de Leiria	II e VI
Empresa Electro Cerâmica	XXVII
Empresa de Produtos Asfálticos	X
Empresa de Sondagens e Fundações Teixeira Duarte, Lda.	3.ª da capa
Empresa Técnica de Equipamentos Eléctricos	XI
Empresa Ultramarina de Sondagens e Fundações	XVI
Fanafel	XVI
Fundações Franki, Lda.	I
Guedes & Almeida, Lda.	IX
Heliaço	2.ª da capa
ICI	XXIV
I. S. T.	XXVI
Isoluz	VI
Instrom	III
Jayme da Costa, Lda.	XVII
Johann Keller	XXVI
J. J. Silva & Irmão	XXVI
MAGUE	XIII
Novobra, Lda.	2.ª da capa
Philips Portuguesa	XVIII
Romar	XX
Rotring	XXVIII
Siemens	XIX
Soc. Const. Amadeu Gaudêncio	XXVIII
Soc. Brown Boveri	4.ª da capa
Soc. Michaelis de Vasconcelos	XII
Sociedade Portuguesa Cavan	VIII
Sondagens e Fundações A. Cavaco	IV
Sondagens Ródio, Lda.	XXVIII
Sopecate	IV
STET	XXI
VARIG	XIV
Wild Portugal, Lda.	XV



Montepio de Moçambique — Lourenço Marques

Assente sobre Estacas FRANKI

FUNDAÇÕES FRANKI L.DA

RUA BRAAMCAMP, 13-3.º — LISBOA 1 — TEL. P. P. C. 53 41 12/3/4 — ENDEREÇO TELEGRÁFICO: FRANKI — LISBOA

PRÉDIO SANTOS GIL, 6.º ANDAR — SALA 10 — TEL. 9 11 67 — CAIXA POSTAL 1397

ENDEREÇO TELEGRÁFICO: FRANKI—LOURENÇO MARQUES

Companhia de Carvões e Cimentos do Cabo Mondego

CAL HIDRÁULICA CABO MONDEGO

Fábrica totalmente remodelada

As mais modernas instalações de:

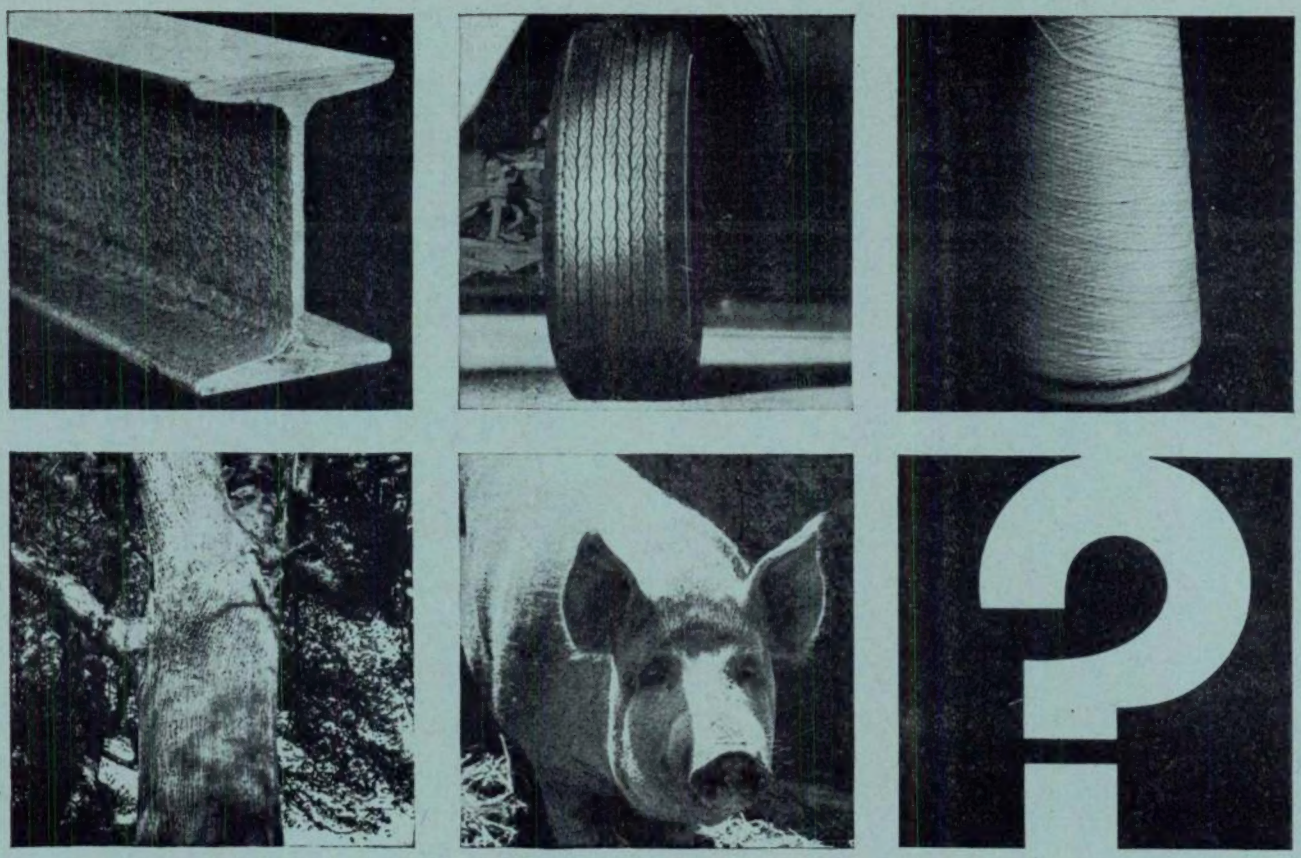
Cozedura	Com ar insuflado
Hidratação	Patente portuguesa projectada e construída em Portugal
Moagem	Automática
Expedição	Máxima rapidez na ensacagem e carregamento

A maior fábrica do País

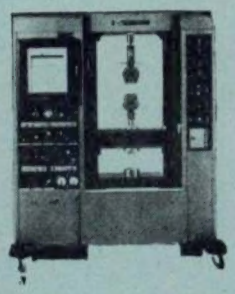
A melhor Cal

A mais barata

Expedição contínua — Di. e noite



Faça ensaios de qualquer material — Instron dir-lhe-á o que há a saber



Faça ensaios de qualquer material desde um pedaço de aço a uma fatia de carne de porco, para pesquisa, melhoramento ou controle da qualidade e o Instrumento de Ensaio Universal Instron dar-lhe-á informações completas e rigorosas acerca das suas propriedades mecânicas. Baseado em princípios electrónicos e num servo-mecanismo para o controle e medição das forças das amostras de ensaio, o Instrumento de Ensaio Instron realizará todos os ensaios convencionais de tensão, compressão e flexão e lançará nova luz sobre uma variedade mais subtil de características incluindo histerese cíclica, afrouxamento e recuperação de tensão, grau de sensibilidade ao esforço e energia da deformação e rotura.

Com três modelos básicos aplicando cargas de 0 a 2 gramas a 0 — 25.000 Kg. em escala completa, com uma grande variedade de acessórios há certamente um sistema Instron para satisfazer as suas necessidades.

Literatura completa à disposição, incluindo muitos estudos especiais. Por favor, queira enviar o talão para informações completas.

Instron Ltd.
Halifax Road, High Wycombe,
Bucks, Inglaterra.

NOME _____

FIRMA _____

MORADA _____

ASSUNTO (*Queira fazer o favor de indicar os materiais em que está especialmente interessado*).

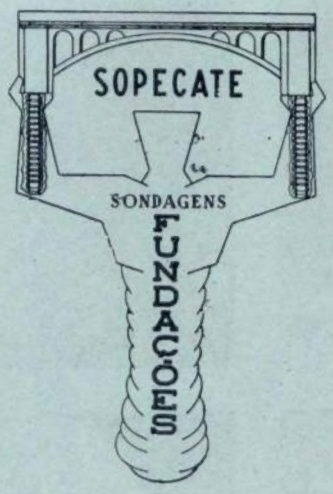
_____

_____

_____

TA

INSTRON



SOPECATE

SONDAGENS
FUNDAÇÕES

Escritório — R. DO ARSENAL, 146, 2.º Esq., Dt.º e Fr.te
Estaleiro e Oficina — RUA PEREIRA HENRIQUES, 58

TELEFONES
SERVIÇOS ADMINISTRATIVOS 34010
SERVIÇOS TÉCNICOS 320208
ESTALEIRO E OFICINAS 381238

LISBOA

• ESTUDOS, PESQUISAS E CAPTAÇÕES DE ÁGUA

• SONDAGENS

• REBAIXAMENTO DE NÍVEIS AQUÍFEROS

• FUNDAÇÕES

SONDAGENS E FUNDAÇÕES A. CAVACO, LDA.

R. RODRIGO DA FONSECA, 62, R C ESQ. — LISBOA - 1
- TELEF. 56 11 71/72/73

ELECTRO-ARCO, L.DA

ELÉCTRODOS ✦ POSTOS ✦ ACESSÓRIOS
PARA A SOLDADURA ELÉCTRICA

*

MATERIAL APROVADO PELOS
LLOYD'S REGISTER OF SHIPPING
BUREAU VERITAS
GERMANISCHER LLOYD

LISBOA
Rua Silva Carvalho, 239
Tels. 68 36 49 - 68 48 93
FÁBRICA E LABORATÓRIOS
Venda Nova — Amadora
Tels. 97 06 13 - 97 17 33
PORTO
Rua do Bolhão, 216
Tel. 2 12 77 - 39 44 73

Diferenciais tipo TMD para 0,5 a 16 toneladas

De dimensões reduzidas, o diferencial TMD é eficiente, versátil, robusto, económico e de fácil manutenção. Uma vasta linha de produção permite a escolha do tipo, velocidade, capacidade e altura de elevação, podendo unidades de diversos tamanhos ser combinadas para fornecer o diferencial apropriado para o fim que se pretende. Inovações fundamentais na concepção do equipamento de comando, estrutura e protecção de sobrecarga. Entregas rápidas, assistência garantida.

ASEA

ASEA ELÉCTRICA LDA. Estrada do Prior Velho - Tel. 2511101* - SACAVÉM
R. do Campo Alegre, 144 - Tel. 62106/7 - PORTO

MARCA AE 8

SENHORES

ARQUITECTOS, ENGENHEIROS, EMPREITEIROS, CONSTRUTORES
DANDO PREFERÊNCIA, NAS VOSSAS OBRAS, AO

BETÃO PRONTO
LIZ

EVITAM: PERDAS DE TEMPO E STOCKS DE MATERIAIS
ECONOMISAM: MÃO-DE-OBRA, E DINHEIRO

UM PRODUTO DAS CENTRAIS DE BETÃO
DA

EMPREZA DE CIMENTOS DE LEIRIA

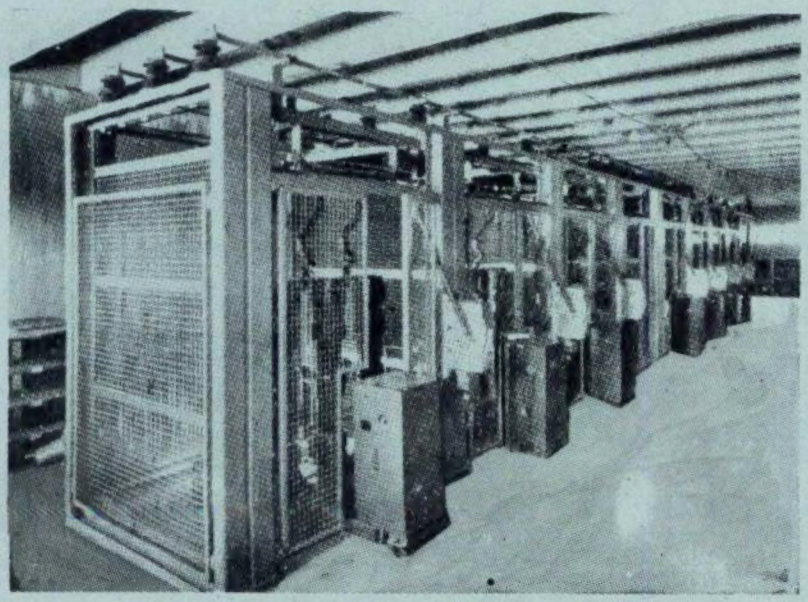
1.ª CENTRAL — AV. INFANTE D. HENRIQUE, LOTE 572
2.ª CENTRAL — RUA B — QUINTA DO PAIZINHO — (CARNAXIDE)
TELEFS: 389796-380031-380032

ISOLUX L.DA

ESTUDOS E INSTALAÇÕES ELÉCTRICAS

Porto
R. de Sá da Bandeira, 651 - 4º
Tel. 27013

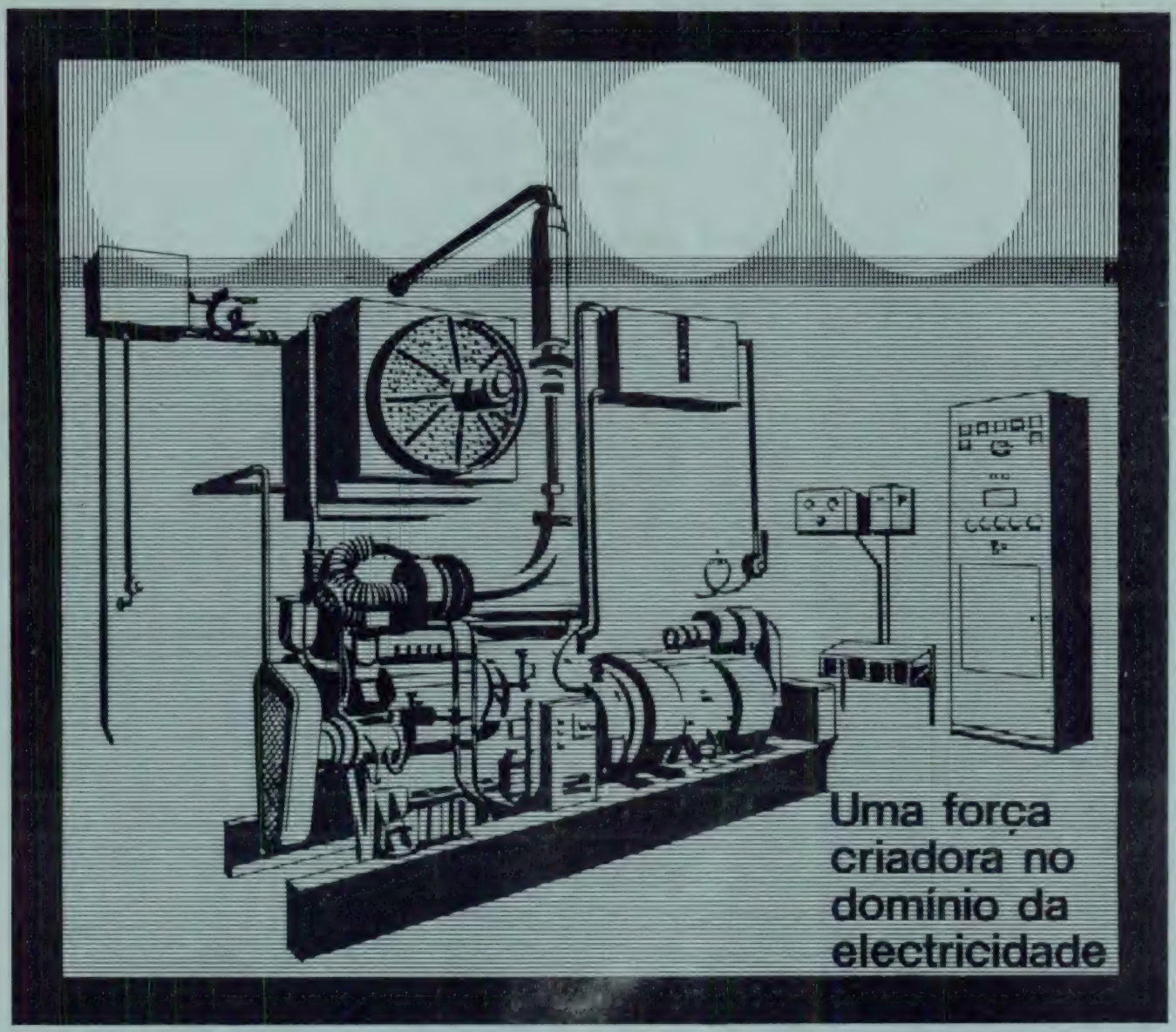
Lisboa
L. Campo Pequeno, 21 - 4º Esq.
Tel. 760964



CELAS ABERTAS DE ALTA TENSÃO

Projectos e instalações eléctricas de:

Centrais
Subestações
Postos de Transformação
Fábricas
Edifícios públicos
Blocos residenciais



Grupos Electrogéneos e Centrais de Emergência

Rapidez de arranque

O tempo de arranque é de 3 a 10 segundos. O motor Diesel arranca a frio, sem problemas.

Prontidão de Serviço

Um constante controle automático assegura a integridade dos circuitos de comando e dos sistemas de refrigeração e de combustível durante os períodos de repouso.

Autonomia de Serviço

Tanto o motor Diesel como o alternador não necessitam de qualquer controle. O equipamento de ventilação e refrigeração é adaptável a todos os casos. Qualquer avaria é imediatamente sinalizada.

ASEA

ASEA ELÉCTRICA LDA. Estrada do Prior Velho - Tel. 2511101* - SACAVÉM
R. do Campo Alegre, 144 - Tel. 62106/7 - PORTO

MARCA AE 9

O EMPREGO DO CIMENTO BRANCO...

permite acabamentos mais perfeitos, mais duradouros e muito mais económicos

Estude a vantagem do emprego do

CIMENTO BRANCO LUSO

Consulte os distribuidores gerais

No Sul: **SCIAL** — T. do Corpo Santo, 15 — Telef. 66 61 86 — Lisboa
No Norte: **SCIAL** — R. do Bonjardim, 205 — Telef. 2 5779 — Porto

POSTES DE BETÃO PARA LINHAS ELÉCTRICAS
MOSAICOS E AZULEJOS
COLUNAS PARA ILUMINAÇÃO PÚBLICA
MANILHAS PARA ESGOTOS

SOCIEDADE PORTUGUESA **Carvam**

RUA D. ESTEFÂNIA, 94-A-LISBOA-1 -TELEF. 47812-50129

WABCO

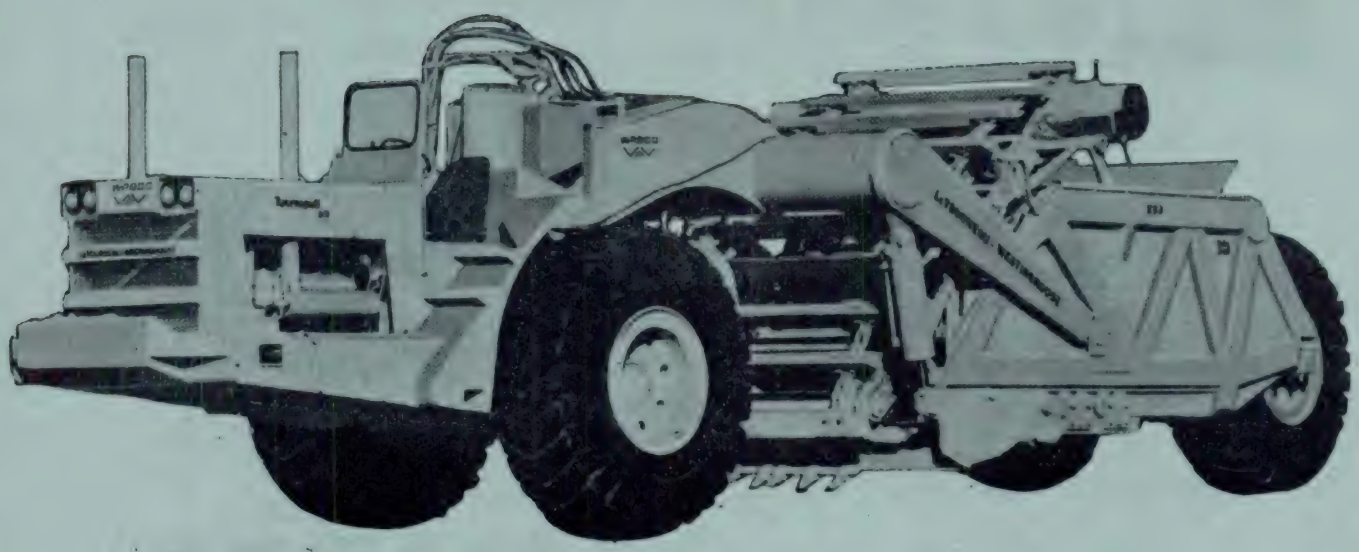
WESTIN'GHOUSE
AIR BRAKE COMPANY
Construction Equipment Division
Peoria (Illinois)-61601

"TOURNAPULL-SCRAPERS"

CAPACIDADE DE 11, 21 E 31 JARDAS CÚBICAS

NÃO NECESSITA DE TRACTOR PARA EMPURRE!
UMA SÓ MÁQUINA... UM SÓ OPERADOR...

Escarifica... Carrega... Transporta... Descarrega... Em terrenos de toda a natureza!



DISTRIBUIDOR EXCLUSIVO

GUEDES & ALMEIDA LDA.

Rua Áurea, 181-2.º — LISBOA-2 — TELEFS. 32 50 80 e 32 78 45

Através das suas organizações de: LISBOA • LUANDA LOBITO • NOVA LISBOA e Agências de: PORTO, GUINÉ, S. TOMÉ E PRÍNCIPE e CABO VERDE fornecerá todos os elementos técnicos, para criteriosa escolha, assistência técnica e sobresselentes.
A1-a

Celulite

ISOLAMENTO
TÉRMICO DAS
CONSTRUÇÕES

PAVIMENTOS
*
TECTOS
*
PAREDES
*
CÂMARAS
FRIGORÍFICAS
*
ISOLAMENTOS
INDUSTRIAIS

Terraços e pavimentos isolados com CELULITE no edifício da Comp.ª de Seguros Fidelidade — P. das Águas Livres — Lisboa

SETH, LDA. • RUA FILIPE FOLQUE, 10-1.° • TEL. 53 01 56 — LISBOA

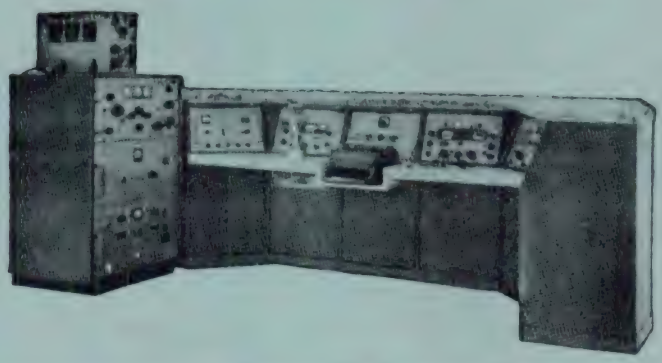
Para impermeabilizar terraços,
paredes, fundações, etc.

COLAGEM DE
TACOS DE MADEIRA

TELEF. 53 0156 TELEG. EPALDA — LISBOA

EMPREZA DE PRODUCTOS ASFÁLTICOS
IMPERMEABILISADOR
IMEPA
RUA FILIPE FOLQUE, 10-1.º-LISBOA

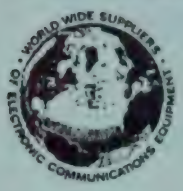
FÁBRICA EM SACAVÉM



Comunicações

equipamentos
e sistemas completos

- Cuidadosamente projectados
- Amplamente experimentados
- Completamente integrados



THE TECHNICAL MATERIEL CORPORATION

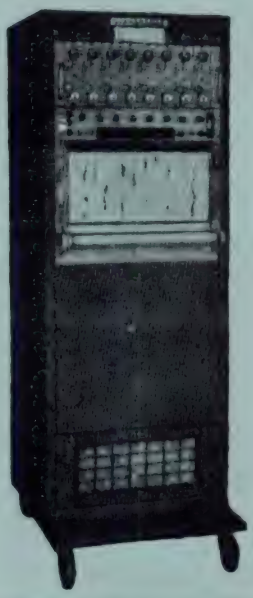
HEWLETT hp PACKARD

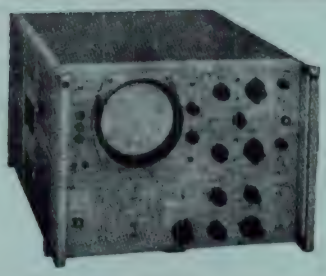
aparelhagem electrónica de medida e registo

Osciloscópios, Oscilógrafos, Voltímetros electrónicos, Geradores de sinal, Contadores electrónicos, Registadores digitais, Fontes de alimentação

Registador digital Dymec

Registador Sanborn





Osciloscópio HP

Contador Electrónico HP

TELECTRA EMPRESA TECNICA DE EQUIPAMENTOS ELECTRICOS, S.A.R.L.

Os pára-raios Oerlikon... ... estão na vanguarda do progresso e protegem instalações em todo o mundo

Corrente de descarga 5 kA

RV
380 & 500 V

VG/WG
6 – 37 kV

Corrente de descarga 5 e 10 kA respectivamente Ondas rectangulares 75 A 1000 µs e 150 A 2000 µs

WGE
40 – 73 kV

Corrente de descarga 10 kA Ondas rectangulares 150 A 2000 µs Membrana anti-explosão

WM/WMR
50 – 500 kV

Insuflação magnética Corrente de descarga 10 kA, Ondas rectangulares 1000 A 2000 µs Membrana anti-explosão

Descarga de longas linhas em vazio, protecção de postos completos, transformadores, alternadores ou consumidores ligados a linhas aéreas. Para cada função, o pára-raios apropriado.

OERLIKON

Para indicações mais amplas consultar os nossos representantes Sociedade Michaëlis de Vasconcellos, Ltda. Porto e Lisboa

Ateliers de Construction Oerlikon · Zurich (Suiça)

Representantes para Portugal e Ultramar: Sociedade Michaëlis de Vasconcellos, Lda., Porto e Lisboa

técnica

NUMERO 373 DEZEMBRO DE 1967 ANO XLII VOL. XXX PUBLICAÇÃO MENSAL

C. D. U. 621.313.292 : 621.314.69

GENERATRICE A SEMI-CONDUCTEURS

par EDMOND GUDEFIN,
JEAN-MARIE KAUFFMANN,
CLAUDE HUMBERT

Lab. d'Electrotechnique
de l'E. N. S. E. M., Nancy

RESUMO

Os autores comparam as caracteristicas eléctricas dum dinamo de semi-condutores às dum dinamo clássico de colector. Neste tipo de máquina, com comutação electrónica, a tensão contínua é obtida por rectificação estática das tensões induzidas nas bobinas dum alternador.

SYNOPSIS

The authors compare the electrical properties of a semi-conductor generator to those of a classical commutator machine. In this type of electronic commutating machine the DC voltage is obtained by static rectification of the voltages induced in the coils of a synchronous generator.

1 — INTRODUCTION

Le développement actuel des turbo-alternateurs de 250 et 600 mégawatts est à l'origine de l'importance prise par les génératrices à semiconducteurs qui sont destinées à remplacer les excitatrices à collecteur. En effet, les unités de forte puissance exigent des courants d'excitation de plus en plus grands dont la commutation par un collecteur tournant pose des problèmes technologiques difficiles à résoudre. Une solution élégante de ce problème consiste à remplacer le système collecteur-balais d'une dynamo classique par un ensemble de redresseurs secs.

Nous nous sommes donc proposés de construire une génératrice à semi-conducteurs, afin de vérifier que ses propriétés électriques étaient bien identiques à celles d'une machine classique.

2 — PRINCIPE DE CONSTRUCTION.

La génératrice a été réalisée en transformant l'enroulement induit d'un alternateur à trois paires de pôles.

Elle comporte dix huit bobines imbriquées formant une armature polyphasée de 18 phases d'ordre 3. Cette armature se décompose donc en trois enroulements hexaphasés identiques permettant deux montages différents des redresseurs.

Premier Montage.

Trois ponts redresseurs hexaphasés branchés sur les trois enroulements induits sont couplés en parallèle du côté continu. Cette disposition nécessite trent six redresseurs.

Deuxième Montage.

Les trois enroulements sont connectés en parallèle et le redressement est effectué par un seul pont hexaphasé, ce qui permet de n'utiliser que douze redresseurs (Fig. 1).

Ces deux types de montages ont été réalisés, seul le second a fait l'objet d'une étude approfondie.

Notons que, si le courant est important, le deuxième montage nécessite plusieurs redresseurs

en parallèle qui introduisent en cas de défaut de l'un d'eux un déséquilibre plus grand que dans le premier montage.

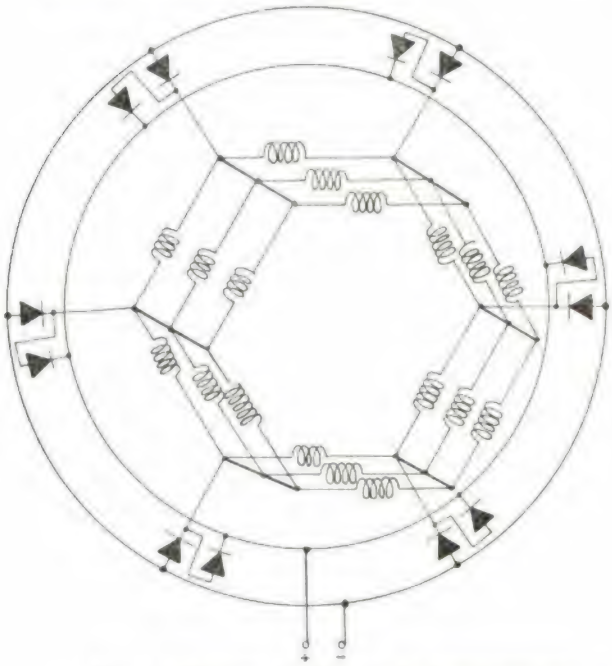


Fig. 1 — Schéma de l'induit de la génératrice

3 — FONCTIONNEMENT DE LA GENERATRICE EN REGIME PERMANENT.

3.1 — Courants et tensions redressés.

La figure 2 montre les oscillogrammes des courants et tensions redressés.

3.2 — Courbes caractéristiques.

Ce sont la caractéristique à vide et les caractéristiques externes pour les différents types d'excitation.

3.2.1 — Caractéristique à vide.

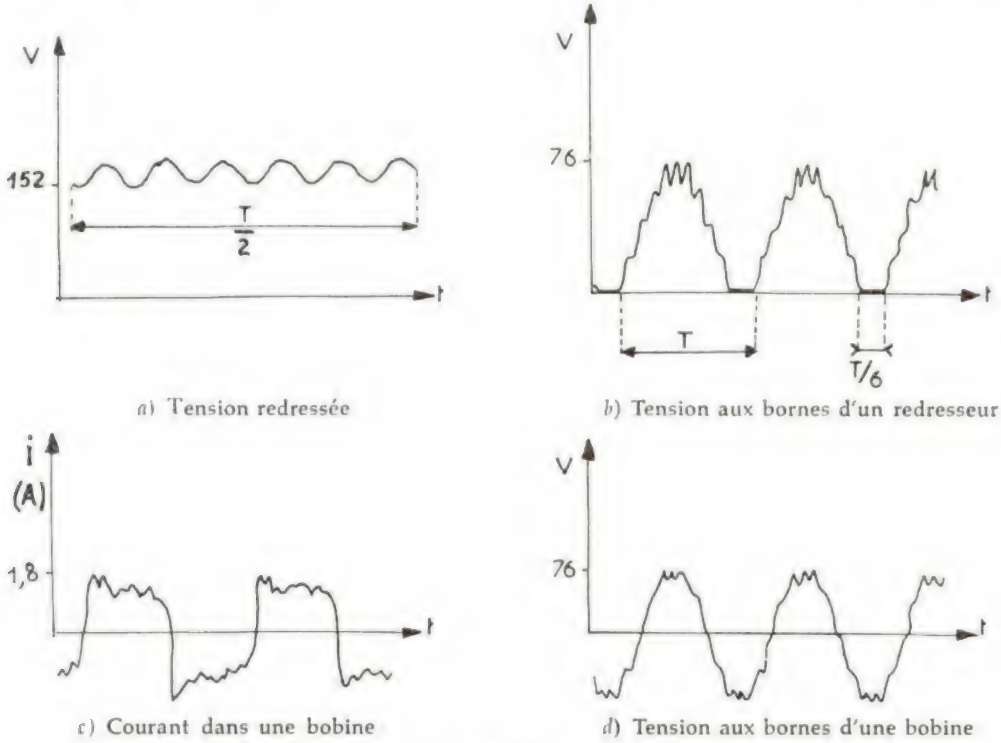
Elle est représentée sur la Fig. 3 et n'appelle pas de commentaires particuliers.

3.2.2 — Caractéristiques externes.

a) *Excitation séparée.* La caractéristique externe à excitation constante peut être déterminée par une méthode indirecte. Nous pouvons calculer la chute de tension dans la génératrice en considérant qu'elle est assimilable à un alternateur hexaphasé dont les enroulements sont connectés en polygone et qui débite à travers des redresseurs sur une résistance. Le problème se traite pour un alternateur par les différentes méthodes indirectes, en particulier celle de Potier. On passe ensuite aux grandeurs redressées pour obtenir la caractéristique externe de la génératrice à redresseurs à excitation constante.

La tension moyenne redressée est définie en fonction de V, tension efficace aux bornes d'un enroulement, par la relation :

$$V_0 = \frac{6}{\pi} \cdot V \cdot \sqrt{2} = 2,7\ V.$$



a) Tension redressée

b) Tension aux bornes d'un redresseur

c) Courant dans une bobine

d) Tension aux bornes d'une bobine

Fig. 2 a-b-c-d

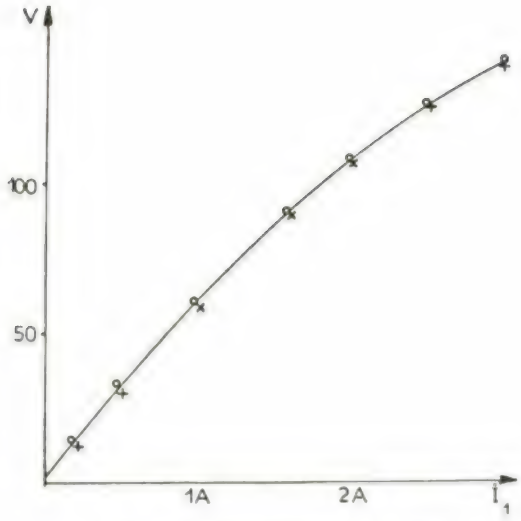


Fig. 3 — Caractéristique à vide

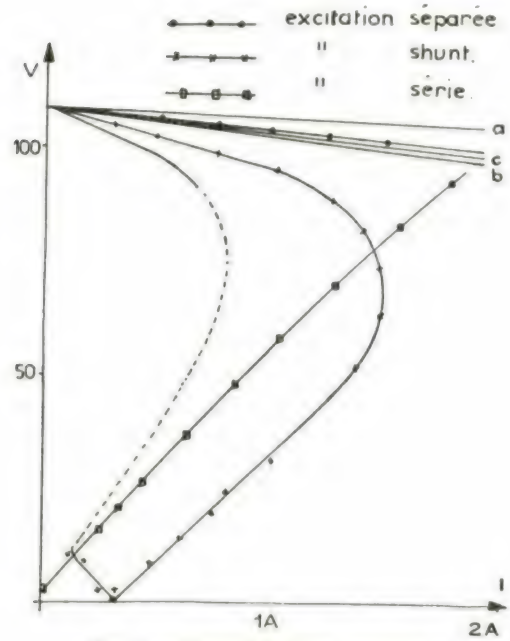


Fig. 4 — Caractéristiques externes

Chaque enroulement hexaphasé est traversé par le courant $\frac{I_0}{2}$, soit dans un sens, pendant une demi-période, soit dans l'autre. L'allure du courant donné par la Fig. 2-c correspond à ce phénomène, abstraction faite des ondulations qui apparaissent. Le courant moyen est donc le double de la valeur efficace du courant dans chaque enroulement

$$I_0 = 2\ I_a$$

La difficulté principale provient du fait que la méthode de Potier suppose le courant sinusoidal, alors que nous venons de voir qu'il n'en étai rien. Nous pouvons envisager trois méthodes différentes.

α — Le courant réel circulant dans l'enroulement est remplacé par un courant sinusoidal ayant même valeur efficace et en phase avec la tension.

β — Le courant est le même qu'en α: mais déphasé par rapport à la tension d'un angle φ, tel que $\cos \varphi = K$, K étant le facteur de puissance du redressement

$$K = \frac{V_0\ I_0}{6\ V_a\ I_a} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} = 0,9$$

γ — On décompose en série de Fourier le courant dans l'enroulement et on ne conserve que le fondamental pour calculer la chute de tension. Nous admettons à nouveau le déphasage introduit en β.

La valeur efficace du courant sinusoidal équivalent est

$$I = \frac{\sqrt{2}}{\pi}\ I_0$$

Nous avons obtenu les résultats suivants :

— Les caractéristiques externes en excitation indépendante sont dans chaque cas des droites (Fig. 4).

— Pour une tension à vide redressée de 109 volts nous obtenons pour un courant de 2 A

— essai direct	V = 100 V
— méthode α	V = 104 V
— méthode β	V = 97 V
— méthode γ	V = 98,5 V

Les trois méthodes donnent des résultats qui encadrent la valeur expérimentale et c'est la dernière qui donne le meilleur résultat.

b) *Excitation série* : La caractéristique externe est analogue à celle d'une génératrice série. La courbe très tendue est pratiquement rectiligne jusqu'au courant nominal.

c) *Excitation shunt* : La courbe présente les mêmes propriétés que celle d'une génératrice shunt.

d) *Excitation compound*. La génératrice utilisée ne possédant qu'un seul enroulement d'excitation, il faut, pour la compounder, utiliser un artifice de montage (Fig. 5).

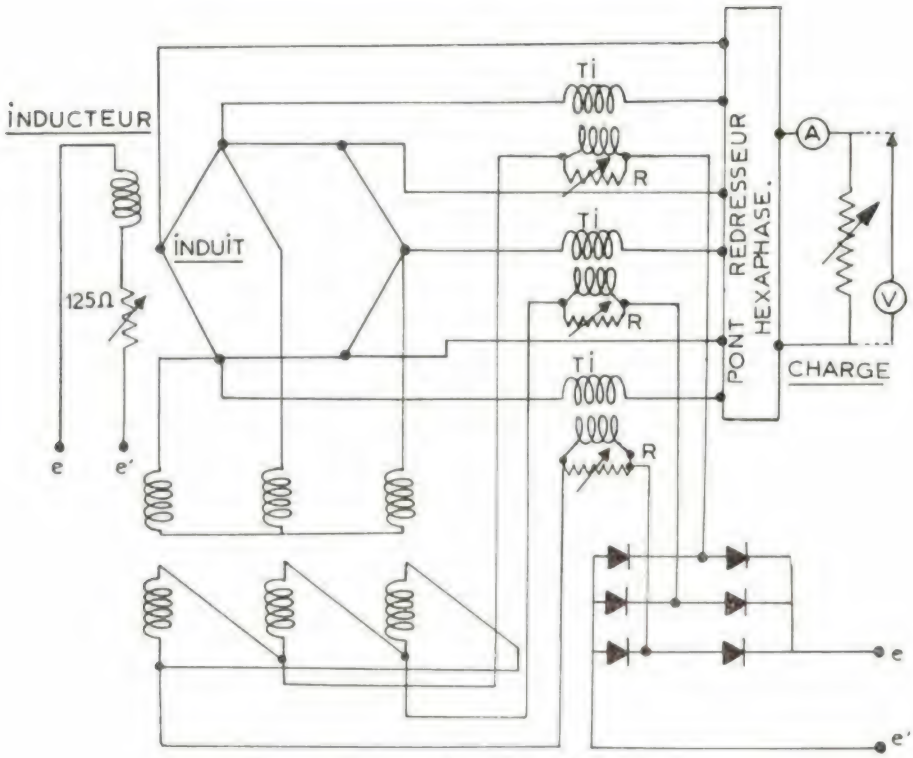


Fig. 5 — Compoundage de la génératrice

Un transformateur de potentiel est en parallèle sur l'induit, et délivre au secondaire une tension $\overline{kV}$ si $\overline{V}$ est la tension induite.

Un transformateur d'intensité dont le primaire est en série avec le rhéostat de charge, par l'intermédiaire des ponts redresseurs, et dont le secondaire est shunté par une résistance R présente au secondaire une tension $\overline{k'I}$ en série avec la résistance R.

La mise en série des deux secondaires donne une tension composée $\overline{kV} + \overline{k'I}$ qui, redressée par un pont de Graetz, alimente l'enroulement d'excitation.

Nous pouvons faire varier $\overline{k}$ et $\overline{k'}$, c'est à dire le taux de compoundage, soit en changeant les rapports de transformation, soit en changeant les résistances R, ce qui permet une variation souple de $\overline{k'}$.

Les caractéristiques externes de la génératrice montée en excitation compound pour différentes positions du rhéostat R sont représentées sur la figure 6. Si le rhéostat R est en court-circuit, le fonctionnement est celui d'une génératrice shunt. Les caractéristiques obtenues sont, en tout point, analogues à celles d'une génératrice compound classique.

Les tensions $\overline{kV}$ e $\overline{k'I}$ présentant toujours un déphasage inférieur à π et $\overline{k'}$ étant toujours inférieur à 1, il est impossible d'obtenir un taux important d'anticompoundage.

4 — DETERMINATION DE L'INDUCTANCE MOYENNE DE L'INDUIT

On va utiliser, pour cet effet, le régime transitoire correspondant à l'amorçage de la génératrice.

Dans le cas d'une génératrice à vide l'équation de l'amorçage s'écrit:

$$E - (R_1 + R_2)\, I = \frac{d\psi}{dt}$$

où ψ représente le flux total dans l'induit et l'inducteur en série, E la force électromotrice à vide et R_1 et R_2 respectivement les résistances de l'inducteur et de l'induit.

L'équation précédente se met sous la forme

$$V_1 = E - R_2\, I = R_1\, I + \frac{d\psi}{dt}.$$

Le montage de la Figure 7 permet de déterminer statiquement la tension V_1 (I) (Figure 8)

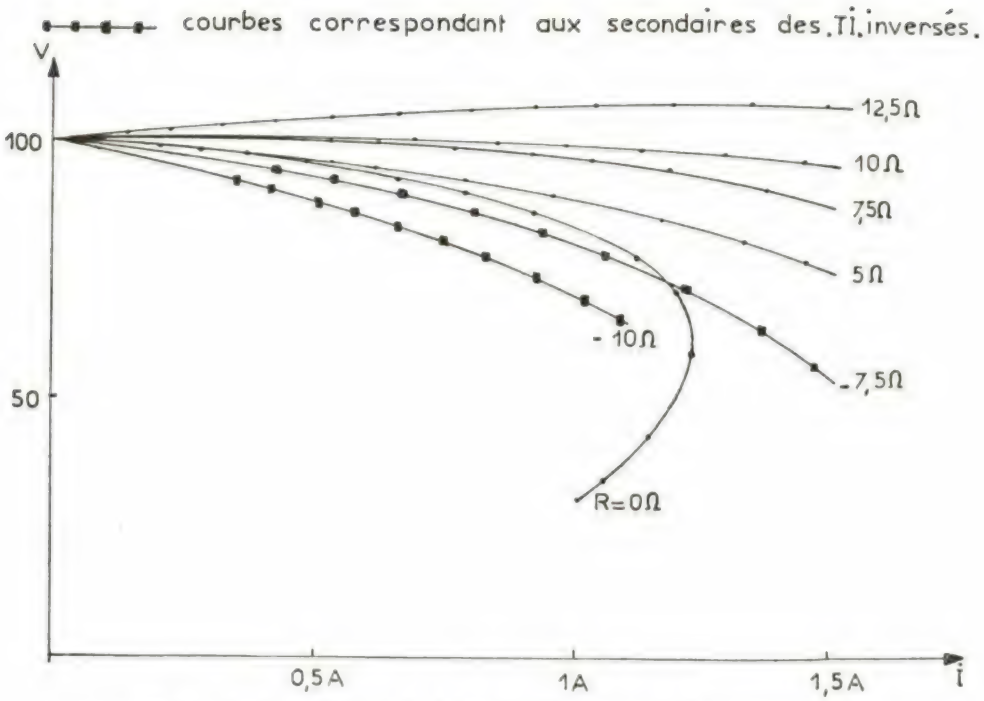


Fig. 6 — Caractéristique de la génératrice en excitation compound

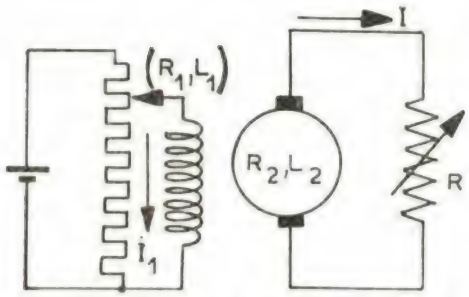


Fig. 7 — Montage pour déterminer la courbe V_1 (I)

à condition de maintenir I et I_1 égaux pour que la machine soit dans les mêmes conditions.

Alors

$$\frac{d\psi}{dt} = V_1 - R_1 I$$

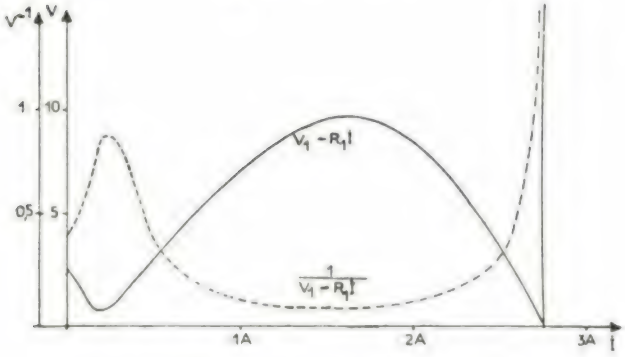


Fig. 8 — Variation de $V_1 - R_1$ I et $\frac{1}{V_1 - R_1 I}$ en fonction de I

soit

$$t = f(I) = \int_0 \frac{d\psi}{V_1 - RI}.$$

Cette variation du courant en fonction du temps a été enregistrée expérimentalement à l'oscillographe.

On peut construire également la fonction

$$g(I) = \int_0^I \frac{dI}{V_1 - RI}.$$

Les deux courbes g (I) et f (I) permettent de définir un coefficient de self inductance totale L (I) (Figure 9).

$$L(I) = \frac{d\psi}{dI} = \frac{f'(I)}{g'(I)} \neq \frac{f(I)}{g(I)}$$

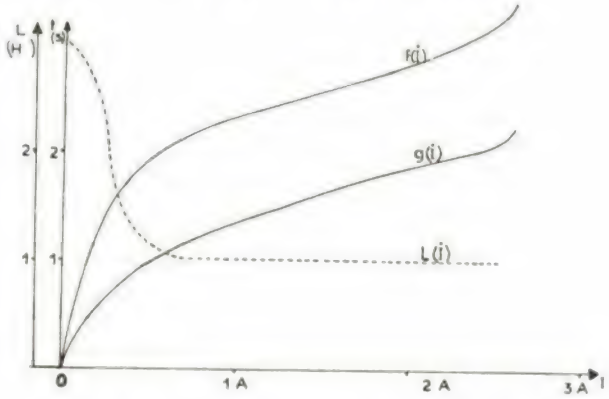


Fig. 9 — Détermination de l'inductance

D'autre part, on peut aussi mesurer le coefficient de self-inductance de l'inducteur en alternatif. Compte tenu des pôles massifs, si V_e, I_e et P sont respectivement la tension aux bornes de la bobine, le courant qui la traverse et la puissance absorbée, L_1 est donnée par l'expression approchée :

$$L_1 = L_1 (I_e) = \frac{V_e^2}{\omega \sqrt{V_e^2 \; I_e^2 - P^2}}$$

Nous constatons que cette inductance est pratiquement constante et très voisine de 0,7 H (Figure 9).

Pour $I > 0{,}5$ A, la différence $L - L_1$ reste constante et on peut considérer qu'elle représente L_2 coefficient de self inductance de l'induit. La divergence des résultats pour $I < 0{,}5$ A provient du fait que dans la mesure au wattmètre le courant varie de $-I$ à I et le cycle d'hystérésis décrit est symétrique par rapport à l'origine, ce qui n'est pas le cas pour la machine munie des redresseurs où le courant varie de 0 à $+I$.

5 — CONCLUSION.

Après avoir étudié la forme des courants, des tensions redressées et des harmoniques, nous avons tracé les principales courbes caractéristiques d'une génératrice à semi-conducteurs réalisée dans notre laboratoire.

La caractéristique à vide et les caractéristiques externes en excitation série, shunt et compound sont comparables à celles d'une génératrice à courant continu classique.

En ce qui concerne le fonctionnement en excitation indépendante, nous avons assimilé la génératrice à semi-conducteurs à un alternateur hexaphasé et nous avons construit la caractéristique externe à partir de la méthode indirecte de Potier. Cette courbe est tout à fait comparable à la caractéristique externe obtenue expérimentalement.

L'amorçage de la génératrice en excitation shunt nous permet de déterminer l'inductance totale de la machine.

Les résultats obtenus montrent que les propriétés de la génératrice à semi-conducteurs sont identiques à celles d'une dynamo à collecteur, ce qui laisse prévoir le remplacement des génératrices à collecteur par ce nouveau type de machine. En utilisant des redresseurs commandés, on pourra la transformer en machine réversible. Dans ce cas, la commutation mécanique doit être remplacée par une commutation électronique synchronisée sur la position du rotor.

MAGUE

PONTE ROLANTE ELÉCTRICA ESPECIAL PARA MANUSEAMENTO DE SUBSTÂNCIAS RADIO-ACTIVAS DE 2 × 1,2 t/9,3 EM SERVIÇO NA SOCIÉTÉ EUROCHEMIC (MOL-BELGICA)

PONTES ROLANTES, GUINDASTES E APAR. DE ELEVAÇÃO ESPECIAIS	*Projecto e fabrico*
TURBINAS HIDRÁULICAS	*Fabrico segundo licença de A. C. M. de Vevey, S. A.*
TURBINAS A VAPOR	*Fabrico segundo licença de Brown Boveri, Cie.*
CALDEIRAS A VAPOR	*Projecto e fabrico segundo licença de Foster Wheeler, Co.*
EQUIPAMENTOS E INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS	

CONSTRUÇÕES METALOMECANICAS **MAGUE** S.A.R.L

ALVERCA DO RIBATEJO — PORTUGAL

McCANN

LISBOA
PARIS

3 VÔOS
SEMANAIS

2.AS 4.AS E 6.AS
FEIRAS

PARTIDA DE LISBOA às 13,10 h
CHEGADA A PARIS às 15,25 h

ALMOCE
E
JANTE
COM A

VARIG

Linhas Aéreas Brasileiras

C. D. U. 532.595

CONTRIBUIÇÃO PARA INTERPRETAÇÃO DO MÉTODO GRÁFICO UTILIZADO NO ESTUDO DO FENÓMENO DO GOLPE DE ARIETE

por JOSÉ REBELLO DA SILVA
Eng.º Mecânico
Assistente I. S. T.

RESUMO

O autor apresenta os elementos básicos para a aplicação do método gráfico de Schnyder-Bergeron, concentrando neste artigo a matéria recolhida em várias fontes de consulta.

SYNOPSIS

This paper presents a collection of elements that are essential when Schnyder-Bergeron's graphic method is to be used.

1 — INTRODUÇÃO

Não é intenção nem pretensão do autor apresentar matéria nova relacionada com a aplicação do método gráfico de Schnyder-Bergeron na resolução de problemas de golpe de ariete. Pretende apenas efectuar uma compilação sumária da matéria tirada de várias fontes, entre as quais as originais no estabelecimento das bases do método gráfico, e conjugar assim as formas de apresentação do problema, por forma a tornar possível uma introdução talvez mais simples no assunto.

* * *

Considera-se uma conduta simples horizontal, ligada num extremo (de montante) a um reservatório de alimentação e dispondo no outro extremo (de jusante) de um obturador, nas seguintes hipóteses simplificativas:

— a conduta é uniforme em material, diâmetro e espessura, em toda a sua extensão;
— o reservatório de montante tem dimensões suficientemente grandes para que se possa admitir que o nível de água nele existente é invariável no tempo;
— o obturador de jusante é capaz de modificar instantâneamente, ou segundo uma lei em função do tempo, o caudal escoado pela conduta e, portanto, a velocidade do escoamento, e descarrega directamente para a atmosfera.
— a conduta permanece completamente cheia de água em todos os instantes e a pressão mínima no seu interior é sempre superior à tensão do vapor de água à temperatura correspondente;
— as perdas de carga à entrada e ao longo da conduta podem desprezar-se, assim como a energia cinética do escoamento, em face das variações de pressão;
— a velocidade de escoamento é constante em cada secção transversal da conduta, e é limitada a valores normais, excluindo, portanto, escoamentos a alta velocidade;
— a pressão é constante em cada secção transversal da conduta e igual à que corresponde ao eixo da mesma.

Considera-se um sistema de eixos de referência, com origem na secção do obturador e o eixo dos xx coincidente com o eixo da conduta, sendo as abcissas positivas contadas a partir da secção do obturador para a secção do reservatório, isto é, em sentido oposto ao escoamento.

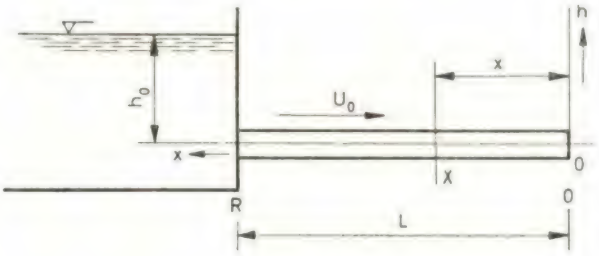


Fig. 1

2 — EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS E SUA INTERPRETAÇÃO

As equações básicas para o estudo do golpe de ariete deduzem-se a partir das equações fundamentais da hidrodinâmica, e para o caso de se considerar a elasticidade da conduta e da água, são

$$\begin{cases} \dfrac{\partial h}{\partial x} = \dfrac{1}{g}\dfrac{\partial U}{\partial t} \text{ — equação dinâmica} & (1') \\ \dfrac{\partial U}{\partial x} = \dfrac{g}{a^2}\dfrac{\partial h}{\partial t} \text{ — equação da continuidade} & (1'') \end{cases}$$

A integração destas equações fornece

$$\begin{cases} h = h_0 + F\left(t - \dfrac{x}{a}\right) + f\left(t + \dfrac{x}{a}\right) & (2') \\ U = U_0 - \dfrac{g}{a}\left[F\left(t - \dfrac{x}{a}\right) - f\left(t + \dfrac{x}{a}\right)\right] & (2'') \end{cases}$$

em que F e f são funções que representam ondas de pressão de forma qualquer — dependente das condições particulares de cada caso — que se propagam ao longo da conduta como um conjunto, sem deformação, com uma velocidade constante *a*, respectivamente no sentido das abcissas positivas e no das abcissas negativas.

De facto, para um observador que se desloque ao longo da conduta com a velocidade *a*, no sentido das abcissas positivas, a sua posição será definida em cada instante t pela expressão

$$x = at + x_1 \qquad (3)$$

em que x_1 é uma constante que define a posição no instante inicial.

Para este observador a função $F\left(t - \dfrac{x}{a}\right)$ mantém o seu valor ao longo do tempo, como se vê fazendo intervir a expressão (3),

$$F\left(t - \frac{x}{a}\right) = F\left(t - \frac{at + x_1}{a}\right) = F\left(\frac{x_1}{a}\right) = C.^{te}$$

Isto significa que a função F acompanha o observador no seu deslocamento ao longo da conduta, deslocando-se, portanto, com a velocidade *a*, da secção do obturador para a secção do reservatório.

Para a função $f\left(t + \dfrac{x}{a}\right)$ o raciocínio é semelhante invertendo o sentido de deslocamento do observador fictício, cuja posição será então definida pela expressão

$$x = -at + x_2 \qquad (4)$$

Das equações 2′ e 2″ vê-se então que a variação de pressão num ponto qualquer da conduta, expressa por $h - h_0$, é igual à soma das duas ondas de pressão $F\left(t - \dfrac{x}{a}\right)$ e $f\left(t + \dfrac{x}{a}\right)$. Do mesmo modo a variação da velocidade, $U - U_0$, é igual à diferença daquelas duas ondas multiplicada por g/a.

Para um movimento qualquer do obturador, a variação instantânea da velocidade dá origem à formação de uma onda de pressão do tipo F, na secção do obturador, que se propaga ao longo da conduta com a velocidade *a*. Logo que esta onda alcança a secção do reservatório, forma-se nesta uma onda reflectida do tipo f. A relação entre F e f, estabelece-se considerando a secção do reservatório, de abcissa $x = L$, na qual a pressão é dada pelas leis da hidrostática, mantendo-se, portanto, constante. Aplicando então a esta secção a equação 2′, resulta, por ser $h = h_0$,

$$F\left(t - \frac{L}{a}\right) = -f\left(t + \frac{L}{a}\right) \qquad (5)$$

Vê-se assim que a onda de pressão F dá origem na secção do reservatório, no instante em que a atinge, a uma onda reflectida f, de igual valor absoluto mas de sentido oposto.

A expressão (5) é válida para a secção do obtuarador num instante anterior ao que se considera para a secção do reservatório do tempo de propagação das ondas entre as duas secções (tempo de deslocamento total na conduta); substituindo, portanto, t por $\left(t - \dfrac{L}{a}\right)$, na expressão (5) resulta, para a secção do obturador,

$$f(t) = -F\left(t - \frac{2L}{a}\right) \qquad (6)$$

o que significa que no obturador a onda reflectida é igual e de sinal contrário à onda directa que nele se formara $\dfrac{2L}{a}$ segundos antes. Designando cada intervalo $T_r = \dfrac{2L}{a}$, contado a partir da secção do obturador, por «tempo de reflexão

total da conduta», ou simplesmente «tempo de reflexão da conduta», e introduzindo em (6), vem

$$f(t) = -F(t - T_r) \qquad (6')$$

Para uma secção qualquer X da conduta, de abcissa x, é também aplicável a expressão (5) desde que se substitua t por $t - \frac{L}{a} + \frac{x}{a}$; resulta então

$$f\left(t + \frac{x}{a}\right) = -F\left(t + \frac{x}{a} - \frac{2L}{a}\right) \qquad (7)$$

ou a expressão equivalente

$$f\left(t + \frac{x}{a}\right) = -F\left(t - \frac{x}{a} - \frac{2(L-x)}{a}\right) \qquad (7')$$

que mostra que o valor da função f numa secção qualquer da conduta é igual e de sinal contrário ao valor que a função F tomara nessa secção $\frac{2(L-x)}{a}$ segundos antes. Ora $\frac{2(L-x)}{a}$ é precisamente o tempo que a onda de pressão necessita para se deslocar, com a velocidade de a, da secção X até à secção do reservatório e regressar a X; designando este intervalo $T_{rx} = \frac{2(L-x)}{a}$ por «tempo de reflexão da conduta na secção X» e introduzindo em (7') resulta

$$f\left(t + \frac{x}{a}\right) = -F\left(t - \frac{x}{a} - T_{rx}\right) \qquad (7'')$$

3 — EVOLUÇÃO DO FENÓMENO PARA O CASO DE FECHO TOTAL INSTANTÂNEO

Para um fecho total instantâneo do obturador, a partir da abertura total, a evolução do fenómeno dá-se então da seguinte forma:

No instante de fecho, que se toma como origem dos tempos ($t = 0$), anula-se o caudal Q_0 na secção do obturador e ao consequente anulamento da velocidade U_0 corresponde um aumento da pressão h_0, por transformação da energia cinética em energia potencial. Forma-se então uma onda de pressão directa F, na secção imediatamente a montante do obturador, que se propaga ao longo da conduta, em correspondência com o anulamento da velocidade nas sucessivas secções destas. Devido à elasticidade da água e da conduta a propagação do fenómeno não se dá instantâneamente, mas sim com uma velocidade finita a.

No instante $t = \frac{L}{a}$ a onda F atinge a secção do reservatório e a água ao longo de toda a conduta encontra-se em repouso e sujeita a uma sobrepressão,

$$h_1 - h_0 = \frac{a}{g} U_0 \qquad (8)$$

que se obtém a partir das equações integrais (2') e (2'') por eliminação da função F, tendo em atenção que $f = 0$. Como a pressão na secção do reservatório é constante e dada pelas leis da hidrostática, forma-se então uma corrente da conduta para o reservatório, com uma velocidade igual em valor absoluto e de sentido oposto à velocidade U_0 do escoamento em regime permanente; de facto, aplicando agora as equações (2') e (2'') à secção do reservatório, de abcissa $x = L$, vem

$$\begin{cases} h_{L,t} - h_{L0} = F\left(t - \frac{L}{a}\right) + f\left(t + \frac{L}{a}\right) = 0 \\ U_{Lt} - U_0 = -\frac{g}{a}\left[F\left(t - \frac{L}{a}\right) - f\left(t + \frac{L}{a}\right)\right] \end{cases} \qquad (9)$$

e substituindo a primeira na segunda, resulta

$$U_{Lt} - U_0 = -2\frac{g}{a} F\left(t - \frac{L}{a}\right)$$

ou, por ser $t = \frac{L}{a}$,

$$U_{Lt} - U_0 = -2\frac{g}{a} F(0) \qquad (10)$$

Esta expressão mostra que a variação da velocidade produzida pela onda F quando atinge a secção do reservatório é igual a duas vezes a variação da velocidade, $U_{xt} - U_0 = -\frac{g}{a} F(0)$, que essa mesma onda produzira, no instante $t = \frac{x}{a}$, em cada uma das secções da conduta desde a secção do obturador até à secção imediatamente a jusante da secção do reservatório e que correspondera precisamente ao anulamento, nessas secções, da velocidade U_0 em regime permanente. Como consequência desta variação de velocidade forma-se na secção imediatamente a jusante do reservatório uma onda de pressão reflectida f que se propaga na direcção do obtu-

rador com a velocidade a, em correspondência com a criação da velocidade $-U_0$ nas sucessivas secções da conduta. Dá-se agora a transformação da energia potencial em energia cinética e as secções da conduta vão ficando sucessivamente, a partir da secção do reservatório, sujeitas novamente à pressão inicial h_0.

No instante $t = \frac{2L}{a} = T_r$, em que a onda f atinge a secção do obturador, a água ao longo de toda a conduta está sujeita à pressão h_0, mas animada de uma velocidade $-U_0$, igual em valor absoluto mas de sentido oposto à velocidade de escoamento em regime permanente. Não podendo a água despegar-se da secção do obturador, verifica-se então o anulamento da velocidade $-U_0$ nesta secção, com a correspondente transformação de energia cinética em energia potencial e respectiva formação da onda de pressão directa $-F$, igual em valor absoluto mas de sinal contrário à onda F produzida T_r segundos antes.

No instante $t = \frac{3L}{a}$ a onda $-F$ atinge a secção do reservatório e a água, ao longo de toda a conduta, volta a ficar em repouso mas sujeita agora a uma depressão.

$$h_2 - h_0 = -\frac{a}{g} U_0 \qquad (11)$$

Forma-se então uma corrente do reservatório para a conduta com uma velocidade igual à velocidade U_0 em regime permanente, que dá origem à formação da onda de pressão reflectida $-f$, igual em valor absoluto mas de sinal contrário à onda f, produzida T_r segundos antes. A energia potencial transforma-se em energia cinética e as secções da conduta vão recuperando as condições inciais (h_0, U_0), o que se verifica na totalidade no instante $t = \frac{4L}{a} = 2T_r = T$, em que a onda $-f$ atinge a secção do obturador. Repetem-se então os fenómenos descritos com um período $T = \frac{4L}{a}$.

Para uma secção qualquer X da conduta, de abcissa x verifica-se então que no instante $\frac{x}{a}$ ela é atingida pela onda directa $F\left(t - \frac{x}{a}\right) = F(0)$ e, como a onda reflectida f é nula, fica sujeita a uma sobrepressão dada por (8); a velocidade, entretanto, anula-se nessa secção. Estas condições mantêm-se até que a onda reflectida $f\left(\frac{L}{a}\right)$ que se forma no instante $\frac{L}{a}$, atinge a secção, no instante

$$\frac{L}{a} + \frac{L-x}{a} = \frac{2L-x}{a},$$

ou seja

$$\frac{2(L-x)}{a} = T_{rx}$$

segundos depois do início nela da fase de sobrepressão; neste instante, $\frac{2L-x}{a}$ a secção volta a ficar sujeita à pressão inicial h_0 e fica animada de uma velocidade $-U_0$. No instante $T_r + \frac{x}{a}$ a secção é atingida pela onda directa $-F(0)$ e fica sujeita a uma depressão dada por (11), ao mesmo tempo que a velocidade $-U_0$ se anula. O regime mantém-se até ao instante $T_r + \frac{2L-x}{a}$ durante um intervalo de tempo novamente igual a T_{rx}, em que a onda reflectida $-f\left(\frac{L}{a}\right)$ atinge a secção, originando nela novamente o regime inicial de pressão e de velocidade. O ciclo do fenómeno na secção X completa-se no instante $T_r + \frac{x}{a} = \frac{4L+x}{a}$, epetindo-se então com o período $T = \frac{4L}{a}$.

Vê-se, portanto, que a acção da onda directa F numa secção X da conduta se traduz numa variação de pressão obtida à custa do anulamento da velocidade do escoamento em regime permanente, e o regime por ela criado se mantém durante o tempo de reflexão da conduta na secção considerada, T_{rx}, sendo então alterado pela acção da onda reflectida f; e a acção da onda reflectida f pode, assim, traduzir-se pela criação de uma velocidade de escoamento igual em valor absoluto e de sentido oposto à que existia num instante T_{rx} segundos anterior, à custa do anulamento da variação da pressão, isto é, restabelecendo a pressão em regime permanente.

4 – FUNDAMENTOS DO MÉTODO GRÁFICO

O método gráfico de Schnyder-Bergeron para a resolução do problema do golpe de ariete compreende fundamentalmente o traçado das curvas velocidade — pressão em função do grau de abertura do obturador (curvas do obturador) e em função do golpe de ariete de Allievi (linhas do golpe de ariete) e a determinação sobre estas curvas dos pontos correspondentes ao regime, na secção e no instante a que se refere o estudo.

À saída do obturador toda a energia potencial se transforma em energia cinética e, então, conjugando as equações de Torricelli e da continuidade e fazendo intervir o grau de abertura ψ_t do obturador, pode escrever-se a equação das curvas do obturador

$$U = \psi_t \cdot \sqrt{2gh} \qquad (12)$$

Esta equação representa uma família de parábolas, uma para cada valor de ψ_t. Para o regime permanente é $S_t = S_o$, de que resulta $\eta_o = 1$ e, consequentemente, $\psi_o = k$.

As linhas do golpe de ariete constituem a representação gráfica das equações de regime conjugadas

$$h_{xt} - h_{x_1 t_1} = \pm \frac{a}{g}\left(U_{xt} - U_{x_1 t_1}\right) \qquad (13)$$

cuja dedução se indica, já que ela contém o princípio básico do método gráfico.

O regime do escoamento numa secção qualquer da conduta, num instante t_1 é devido ao cruzamento das duas ondas de pressão F e f e exprime-se analìticamente a partir das equações integrais (2') e (2'')

$$h_{xt} - h_{xo} = F\left(t - \frac{x}{a}\right) + f\left(t + \frac{x}{a}\right) \qquad (2', x, t)$$

$$U_{xt} - U_{xo} = -\frac{g}{a}\left[F\left(t - \frac{x}{a}\right) - f\left(t + \frac{x}{a}\right)\right] \qquad (2'', x, t)$$

referindo as ondas de pressão F e f ao instante t_1 considerado. Um observador fixo numa secção X_1 de abcissa x_1 não pode tirar uma relação única entre h e U, pois como as ondas F e f variam em cada ponto com o tempo, existem quatro variáveis nas duas equações acima indicadas. Em contrapartida, se o observador for suposto móvel com a velocidade a, partindo da secção X_1 no instante t_1 e deslocando-se, por exemplo, no sentido da velocidade do escoamento U_o, a função f mantém para ele valor constante; ficam apenas então três variáveis, h, U, F nas equações anteriores e, eliminando F, resulta uma lei ligando h e U, que é válida para todos os pontos por onde o observador passa, entre a secção X_1 e a secção 0 do obturador.

Aplicando então as equações (2') e (2'') à secção X_1 no instante t_1, vem

$$\begin{cases} h_{x_1 t_1} - h_{x_1 o} = F\left(t_1 - \frac{x_1}{a}\right) + f\left(t_1 + \frac{x_1}{a}\right) & (2', x_1, t_1) \\ U_{x_1 t_1} - U_{x_1 o} = -\frac{g}{a}\left[F\left(t_1 - \frac{x_1}{a}\right) - f\left(t_1 + \frac{x_1}{a}\right)\right] & (2'', x_1, t_1) \end{cases}$$

e eliminando a variável $F_{t_1} = F\left(t_1 - \frac{x_1}{a}\right)$ resulta

$$h_{x_1 t_1} - h_{x_1 o} = -\frac{a}{g}\left(U_{x_1 t_1} - U_{x_1 o}\right) + 2f\left(t_1 + \frac{x_1}{a}\right) \qquad (14)$$

Para uma posição qualquer X de abcissa x, é válida entre X e 0 a expressão

$$h_{xt} - h_{xo} = -\frac{a}{g}\left(U_{xt} - U_{xo}\right) + 2f\left(t + \frac{x}{a}\right) \qquad (15)$$

que se deduz das equações (2', x, t) e (2'', x, t) eliminando F_t entre elas. Atendendo a que, sendo a posição do observador dada por $x = x_1 - (t - t_1)\,a$, é

$$f_{t_1} = f\left(t_1 + \frac{x_1}{a}\right) = f_t = f\left(t + \frac{x}{a}\right) = C.^{te}$$

e como também

$$h_{x_1 o} = h_{xo},$$

a combinação das equações (14) e (15) fornece a segunda equação conjugada

$$h_{xt} - h_{x_1 t_1} = -\frac{a}{g}\left(U_{xt} - U_{x_1 t_1}\right) \qquad (13)$$

A primeira equação conjugada deduzia-se de forma análoga, considerando o observador a

deslocar-se entre X_1 e R, com a velocidade a, em sentido oposto ao do escoamento (equação de posição $x = x_1 + (t - t_1)\, a$).

O regime (x, t) isto é, o regime numa secção qualquer de abcissa x no instante t, pode, pois, ser determindo a partir do regime (x_1, t_1), desde que se verifique a relação

$$x = x_1 \pm (t - t_1)\, a \qquad (16)$$

As equações de regime conjugadas (13) permitem então concluir [1] que a diferença entre a altura de pressão num dado instante num ponto qualquer da conduta e a altura de pressão que reinava noutro ponto da conduta, num instante anterior ao considerado de um tempo igual ao tempo de deslocamento, com a velocidade a, entre os dois pontos, é dada em valor absoluto pelo valor do golpe de ariete de Allievi, função da diferença das velocidades do escoamento existentes em cada um dos pontos nos instantes respectivos, e é positiva ou negativa, respectivamente, conforme o escoamento se efectua do primeiro para o segundo ponto, ou no sentido inverso.

No diagrama U,h as equações de regime conjugadas representam rectas de coeficiente angular $\pm \frac{a}{g}$, correspondendo o sinal (+) ao deslocamento do observador em sentido contrário ao escoamento permanente e o sinal (—) ao deslocamento no sentido do escoamento.

Referindo as equações conjugadas às secções extremas da conduta, $x = 0$ e $x = L$, será

$$\begin{cases} h_{0t} - h_{Lt_1} = -\dfrac{a}{g}\,(U_{0t} - U_{Lt_1}) \\[2ex] h_{Lt} - h_{0t_1} = +\dfrac{a}{g}\,(U_{Lt} - U_{0t_1}) \end{cases} \qquad (16)$$

em que $t_1 = t - \frac{L}{a}$. Portanto, sendo conhecido o regime num dos extremos da conduta num dado instante t_1, o regime no outro extremo tem de ser tal que num instante $t = t_1 + \frac{L}{a}$ a variação de pressão e a variação de velocidade entre os dois extremos está sujeita a uma relação linear. O ponto figurativo do regime no segundo extremo existe então sobre a linha do golpe de ariete que passa pelo ponto figurativo do regime no primeiro extremo e é determinado pela intersecção da curva do obturador respectivo no instante t com aquela linha.

5 — REPRESENTAÇÃO DA EVOLUÇÃODO FENÓMENO PARA O CASO DE FECHO TOTAL INSTANTÂNEO

Para a secção do obturador o regime em escoamento permanente é representado pelo ponto O_0 (fig. 2) de intersecção da horizontal de ordenada h_0, com a curva do obturador (12) para o valor respectivo ψ_0 do parâmetro ψ_t. Para um observador deslocando-se da secção do reservatório para a secção do obturador com a velocidade a, os regimes que ele encontra nas sucessivas secções da conduta são representados pelos pontos da recta de coeficiente angular $-\frac{a}{g}$, que passa por O_0. Considerando, como anteriormente, um fecho total instantâneo no instante em que o observador atinge a secção do obturador, como a velocidade do escoamento é nula, a curva do obturador nesse instante coincide com o eixo h das ordenadas e o ponto figurativo O'_0 do regime é obtido pela intersecção da linha do golpe de ariete com aquele eixo.

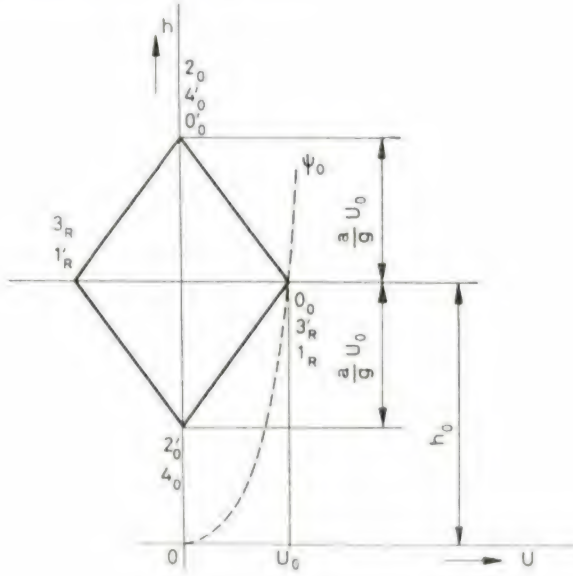


Fig. 2

Toma-se o instante de fecho como origem dos tempos e como unidade de tempo por exemplo,

[1] Ver Bibliografia 7.

$\frac{T_r}{2} = \frac{L}{a} \left(1\,u.t. = \frac{L}{a}\right)$; os pontos figurativos de cada regime representam-se [1] por um número, que corresponde ao instante respectivo, com um índice, que indica a secção considerada.

Na vizinhança do instante zero existem dois regimes na secção *O*, um antes do fecho (O_0) e outro depois do fecho (O'_0). Consideram-se então dois observadores saindo de O no instante zero, um observando o regime depois do fecho e o outro observando-o ontes do fecho.

Para o primeiro observador, durante o deslocamento da secção *O* à secção *R* os regimes existem sobre a linha de golpe de ariete de coeficiente angular $+\frac{a}{g}$ passando por O'_0; como em *R* a pressão é constante e igual a h_0, a posição no observador ao instante 1, em que atinge aquela secção, é representada pelo ponto $1'_R$, intersecção da linha de golpe de ariete com a horizontal de ordenada h_0. Regressando o observador à secção *O*, os regimes existem sobre a linha de golpe de ariete de coeficiente angular $-\frac{a}{g}$ passando por $1'_R$; no instante 2, em que ele atinge a secção do obturador, a velocidade de escoamento é nula e o ponto figurativo do regime é $2'_0$, definido pela intersecção da linha de golpe de ariete sobre o eixo das ordenadas. No novo deslocamento de *O* para *R* a linha de golpe de ariete é a recta de coeficiente angular $+\frac{a}{g}$, passando por $2'_0$ e a posição do observador no instante 3 é dada pelo ponto $3'_R$, coincidente com O_0, de intersecção daquela recta com a horizontal de ordenada h_0. Finalmente no novo trajecto de *R* para *O* tem-se a linha de golpe de ariete de coeficiente angular $-\frac{a}{g}$ passando pelo ponto $3'_R$; a sua intersecção com o eixo das ordenadas, ponto $4'_0$, representa o regime no instante 4. A partir deste instante o ciclo repete-se com um período $T = 4\,.\,u\,.\,t$.

Para o segundo observador partindo de *O* para *R* no instante O_0, imediatamente anterior ao fecho do obturador, a linha de golpe de ariete tem o coeficiente angular $+\frac{a}{g}$ e passa por O_0; no instante 1 o observador encontra-se na secção *R* e o regimé é dado pelo ponto 1_R, de intersecção da linha de golpe de ariete com a horizontal de ordenada h_0. Regressando a *O*, a linha de golpe de ariete passa por 1_R e tem coeficiente angular $-\frac{a}{g}$ e a sua intersecção com o eixo dos hh dá o ponto 2_0, figurativo do regime no instante 2. Novamente de *O* para *R* e, a seguir, de *R* para *O*, determinam-se de forma semelhante os pontos 3_R e 4_0, fechando-se este ciclo.

Para uma secção qualquer de abcissa x os pontos figurativos do regime determinam-se pela intersecção das linhas de golpe de ariete que se cruzam na secção considerada no mesmo instante. Conhecendo os regimes nas secções extremas ao longo do tempo (considerando observadores saindo de R em instantes compreendidos entre $-\frac{L}{a}$ e $+\frac{L}{a}$), traçam-se então os pares de linhas de golpe de ariete correspondentes a dois observadores, saindo um de cada extremo da conduta, que iniciam o seu deslocamento com uma desfasagem de $\frac{L-2x}{a}$ segundos e determinam-se os respectivos pontos de intersecção; de facto, $\frac{x}{a}$ e $\frac{L-x}{a}$ são os tempos que os observadores, saindo, respectivamente da secção do obturador e da seccão do reservatório, levam para atingir a secção de abcissa x e, para que a sua chegada à secção considerada seja simultânea, é necessário que o observador que parte de *O* o faça com a desfasagem indicada em relação ao que sai de *R*. Por exemplo, para a secção $X_{L/4}$ de abcissa $x = \frac{L}{4}$ a desfasagem do início do deslocamento dos dois observado·es é de $\frac{L}{2a}$; portanto, um observador que saísse de *O*, por exemplo, no instante igual a 0,5 unidades de tempo [1], encontraria na secção indicada, no instante igual a 0,75 unidades de tempo, o

---

[1] Ver Bibliografia 2.

[1] Quando se pretende determinar os estados de regime em secções intermediárias da conduta convém adoptar uma escala de tempo que facilite a escrita para a identificação dos regimes. No caso apresentado, por exemplo, convinha adoptar agora $1\,u.t. = \frac{L}{4a}$.

observador que tivesse saído de R no instante zero; para determinar o ponto figurativo do regime $0{,}75x_{L/4}$ traçavam-se as linhas de golpe

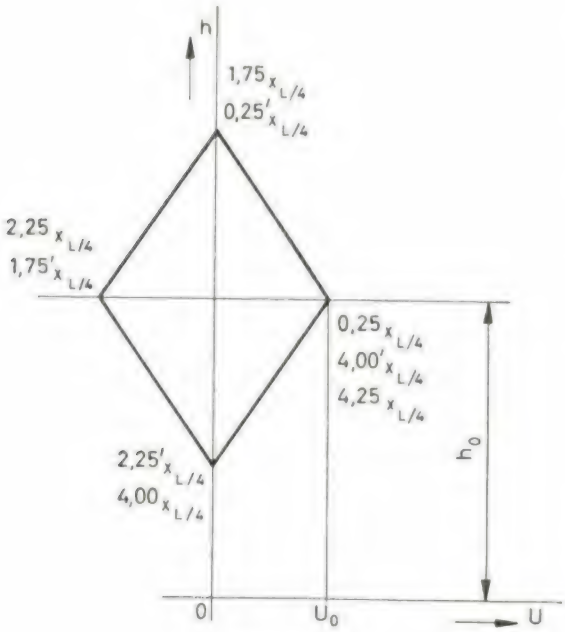


Fig. 3

de ariete de ambos os observadores e determinava-se o ponto de intersecção, que neste caso concreto (fecho instantâneo) corresponde às coordenadas $\left(O\,,\ h_o + \frac{a}{g}\,U_o\right)$.

Representam-se na figura 3 os diagramas dos ciclos relativos à secção $X_{L/4}$ correspondentes aos já anteriormente considerados em relação às secções extremas da conduta. Como estes ciclos se produzem nas mesmas secções da conduta, em instantes infinitamente próximos, tiram-se deles, generalizando para uma secção qualquer de abcissa x, as seguintes conclusões sobre a evolução da velocidade e pressão:

— a velocidade passa instantâneamente do valor $+U_o$ ao valor nulo, no instante $\frac{x}{a}$; do valor nulo ao valor $-U_o$, no instante $\frac{2L-x}{a}$; do valor $-U_o$ ao valor nulo no instante $\frac{2L+x}{a}$; e do valor nulo ao valor $+U_o$, no instante $\frac{4L-x}{a}$;

— a pressão passa instantâneamente do valor da pressão em regime permanente h_o ao da sobrepressão $h_o + \frac{a}{g}\,U_o$, no instante $\frac{x}{a}$; da sobrepressão $h_o + \frac{a}{g}\,U_o$ à pressão h_o, no instante $\frac{2L-x}{a}$; da pressão h_o à depressão $h_o - \frac{a}{g}\,U_o$ no instante $\frac{2L+x}{a}$; da depressão $h_o - \frac{a}{g}\,U_o$ à pressão h_o, no instante $\frac{4L-x}{a}$;

— o ciclo repete-se indefinidamente.

6 — ALGUMAS CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS

Na prática, em lugar da conduta horizontal considerada aparece, como regra geral, uma conduta inclinada com um perfil qualquer. No entanto, o que se pretende normalmente determinar é o valor da sobrepressão (ou da depressão) em relação à pressão da conduta em regime permanente, o que justifica a consideração da hipótese formulada. Se se pretender determinar o valor máximo (ou mínimo) da pressão total numa dada secção da conduta não se tem mais do que somar ao valor da pressão estática nessa secção o valor da sobrepressão (ou depressão) produzida pelo golpe de ariete.

O tempo do fecho do obturador e a forma como é realizado são factores decisivos para a evolução do fenómeno do golpe de ariete. A um fecho instantâneo correspondem valores constantes e iguais em valor absoluto da sobrepressão e da depressão em todas as secções da conduta, dados pela expressão (8) e que se designa por golpe de ariete de Allievi; apenas varia o seu tempo de permanência que é igual, para cada secção, ao tempo de reflexão da conduta nessa secção e, portanto, é máximo na secção do obturader, reduzindo-se linearmente até se anular na secção do reservatório. No caso real de uma manobra linear com um tempo de fecho finito, o problema do golpe de ariete resolve-se considerando separadamente a acção de uma série de ondas parciais F e f — correspondentes ao deslocamento de observadores, nas condições dos anteriormente referidos, mas saindo em instantes sucessivos durante um intervalo de tempo igual à duração do fecho — e sobrepondo o seu efeito.

Para $0 < t_f < \frac{2L}{a}$ pode fàcilmente constatar-se que ainda se verifica a sobrepressão (e a depressão) máxima (igual à que corresponderia a um fecho instantâneo) em todas as secções da conduta cujo tempo de reflexão seja superior ao valor do tempo de fecho do obturador e que o seu tempo de permanência é precisamente igual à diferença entre aqueles dois valores $(T_{rx} - t_f)$; da secção a que corresponde a igualdade destes valores até à secção do reservatório a sobrepressão (e a depressão) reduz-se linearmente até se anular.

Quando for $t_f = \frac{2L}{a}$ pode considerar-se que só na secção do obturador se apresenta o valor máximo de sobrepressão (e de depressão), com um tempo de permanência infinitamente pequeno, reduzindo-se linearmente aquele valor ao longo da conduta até se anular na secção do reservatório.

Para tempos de fecho $t_f > \frac{2L}{a}$ e acrescentes, os valores da sobrepressão (e da depressão) vão sendo cada vez mais reduzidos em relação aos que corresponderiam ao fecho instantâneo, variando, além disso, e da mesma forma que anteriormente, de forma linear, desde o valor nulo na secção do reservatório até um valor máximo na secção do obturador.

Numa próxima publicação entraremos em maiores pormenores sobre a influência do valor do tempo de fecho.

Considerou-se uma manobra do obturador correspondente a um fecho total a partir da posição de máxima abertura; em relação a um caso da abertura total, a partir da posição de fecho total, proceder-se-ia de forma semelhante. Nota-se que tanto para fecho como abertura a partir de posições intermédias já o problema se apresentaria, de modo geral, sob uma forma mais desfavorável.

O caso de um escoamento de sentido inverso ao considerado (caso, por exemplo, do funcionamento das bombas) não apresenta diferenças estruturais essenciais.

A representação em diagrama que se referiu a um sistema de eixos velocidade — pressão, podia igualmente ter sido referida a um sistema de eixos caudal-pressão, o qual, aliás, é preferível em muitas circunstâncias. Igualmente é corrente a representação em valores relativos, referidos a um dado regime de funcionamento da instalação.

Apêndice

Significado dos símbolos

L — comprimento da conduta.

D — diâmetro da conduta.

e — espessura da conduta.

Ω — secção da conduta.

E — módulo de elasticidade do material da conduta.

E_a — módulo de elasticidade da água.

$$a = \sqrt{\frac{\frac{g}{\gamma}}{\frac{1}{E_a} + \frac{D}{e}\frac{1}{E}}}$$ — velocidade de propagação das ondas pressão.

$h = \frac{p}{\gamma}$ — altura de pressão.

h_o — altura de pressão, em regime permanente.

h_{xt} — altura de pressão na secção x e instante t.

U — velocidade média do escoamento numa secção.

U_o — velocidade média do escoamento numa secção em regime permanente.

U_{xt} — velocidade média do escoamento na secção x e instante t.

S_o — secção de passagem do obturador em máxima abertura (regime permanente)

S_t — secção de passagem do obturador no instante t.

$n_t = \frac{S_t}{S_o}$ — grau absoluto de abertura do obturador no instante t.

$K = \frac{S_o}{\Omega}$ coeficiente do obturador — conduta.

$\psi_t = n_t K$ — grau relativo de abertura do obturador no instante t.

T_r — tempo de reflexão (total) da conduta.

T_{rx} — tempo de reflexão da conduta na secção x.

t_f — tempo de fecho do obturador.

BIBLIOGRAFIA

1 — Abecassis (F.) — Hidráulica Geral — Edição A.E. I.S.T. — 1961.

2 — Bergeron (L.) — Du coup de bélier em hydraulique au coup de foudre en électricité — Dunod Éditeur — 1950.

3 — Jaeger (C.) — Engineering fluid dynamics — Blackie & Son Ltd. — 1956.

4 — Mosonyi (E.) —Wasserkrafwerke (vol. II, cap. 91). — Academia Húngara de Ciências (tradução alemã) — 1959.

5 — Parmakian (J) — Waterhammer analysis — Dover Publications — 1963.

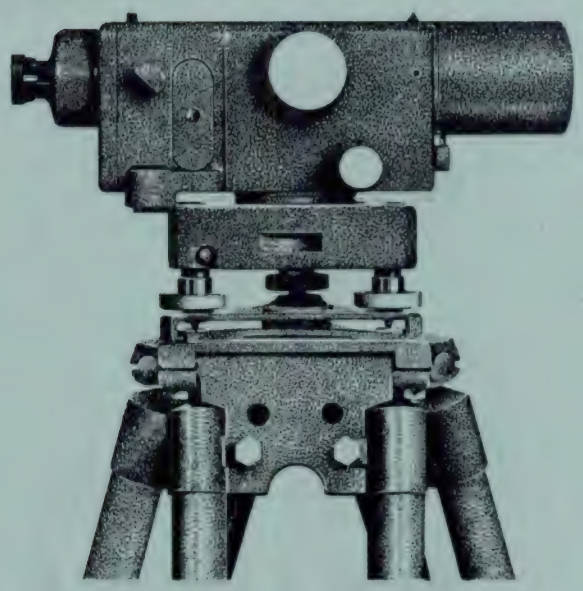
6 — Schnyder (O.) — Druckstösse in Rohrleitungen — Mitteilung Von Roll — Nr 3/4, Fev. / Junho 1943.

7 — Schnyder (O.) — Ueber Druckstösse in Rohrleitungen — Wasserkraft und Wasserwirtschaft — Helft 5 — 2 e 16/3/32.

O novo Nível automático de engenheiro

WILD NAK 2

com círculo horizontal



WILD
HEERBRUGG

Para nivelamentos de média e grande precisão; com micrómetro de lâmina de faces plano-paralelas para nivelamentos de grande precisão.

Erro médio para 1 Km de nivelamento duplo: ± 1,5 mm

Erro médio para 1 Km de nivelamento duplo com micrómetro: ± 0,4 mm

Luneta de 30 × de aumento com imagem direita de observação

Solicitem catálogo ou demonstração aos representantes exclusivos

WILD PORTUGAL, LDA.

PRAÇA DAS ÁGUAS LIVRES, 8
LISBOA - 2 — TELEFONE 68 91 27

FILTROS TECIDOS

PARA GAZES E LÍQUIDOS
EM PEÇAS, PANOS, MANGAS OU SACOS

DE QUALQUER FIBRA NATURAL OU SINTÉTICA

FANAFEL

FÁBRICA NACIONAL DE FELTROS INDUSTRIAIS
SOCIEDADE LIMITADA

APART.: 9
TELEFS.: 52093-52094
TELEG.: FELTROS

OVAR
PORTUGAL

ESCRITÓRIO E FÁBRICA
ESTRADA DE S. JOÃO

Empresa Ultramarina de Sondagens e Fundações, L.da

(SONDADORA)

SONDAGENS geológicas e geotécnicas — CAPTAÇÕES de águas subterrâneas — REBAIXAMENTOS do nível freático — CONSOLIDAÇÕES E ESTABILIZAÇÃO do solo — INJECÇÕES DE CIMENTO e outros produtos — INFRAESIRUTURAS de barragens, túneis e pontes — FUNDAÇÕES de todos os tipos

Única Empresa da especialidade com sede no Ultramar Português

DELEGAÇÃO - LISBOA
R.S.Pedro de Alcântara, 1
Tel. 32 46 93 e 21 32 56

SEDE - LUANDA
Rua Serpa Pinto, 60
C.P.2178 - Tel.4226

MOÇAMBIQUE
L.Marques - C.P.982 - Tel.741121
Beira - C.P. 1002 - Tel. 71497

C. D. U. 624.04 : 681.14

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE ESTRUTURAS DE EDIFÍCIOS SOB ACÇÃO DE FORÇAS HORIZONTAIS (*)

por J. FERRY BORGES
Engenheiro Investigador, Chefe do Serviço de Edifícios e Pontes do LNEC
ARTUR RAVARA
Estagiário para Especialista da Divisão de Estruturas do LNEC

RESUMO

Apresenta-se uma formulação que permite o estudo em conjunto das estruturas de edifícios, quando sujeitas à acção de forças horizontais.

Esta formulação generaliza o método usual de cálculo de estruturas reticuladas a estruturas que também incluem paredes. Para o estudo do comportamento do edifício em conjunto, impõe a compatibilidade dos deslocamentos dos elementos estruturais ao nível dos pisos.

Mediante um exemplo evidenciam-se os benefícios que se podem obter pela conveniente associação de paredes resistentes e estruturas reticuladas.

SYNOPSIS

A general matrix formulation for computer analysis of building structures under horizontal loads is derived.

The usual method of frame analysis is generalized in order to enable it to deal also with the association of walls and frames.

Floors are assumed to be rigid enough to equalize diplacements in their planes.

A numerical instance is presented that shows the advantages of associating frames and structural walls.

1 — INTRODUÇÃO

A tendência moderna de construir edifícios cada vez mais volumosos e, sobretudo, cada vez mais altos, impõe que se estude cuidadosamente a sua segurança.

De facto, há algumas dezenas de anos sòmente existiam arranha-céus (de estrutura metálica) num pequeno número de cidades dos Estados Unidos da América do Norte. Hoje, assistimos ao desenvolvimento desse tipo de construção em todos os continentes.

Assim, nas Américas do Norte como do Sul, têm vindo a ser construídos, desde há cerca de 10 anos, edifícios de betão armado com mais de 30 andares. Actualmente, em S. Paulo e em Chicago, encontram-se em construção edifícios de betão armado de 70 pisos [1]. Na Europa, os edifícios de 30 pisos começam a ser usuais em todas as grandes cidades, e é possível encontrar arranha-céus espalhados por todo o Mundo.

As solicitações devidas à acção do vento e dos sismos, que já eram importantes nos edifícios correntes, tomam particular relevo nestes grandes edifícios. Impõe-se, portanto, o seu estudo aprofundado.

Os tipos correntes de estruturas de edifícios variam desde as estruturas aporticadas puras, em que sòmente se considera a existência de lajes vigas e pilares; às estruturas aporticadas mistas, as quais em paralelo com os pilares incluem paredes resistentes; às estruturas aporticadas preenchidas, em que algumas das malhas dos pórticos são preenchidas por paredes cuja contribuição para a resistência de conjunto não é desprezável; até às estruturas sòmente construídas por painéis (formando os pavimentos e as paredes) nas quais, pràticamente não existem pilares.

Para estudar o comportamento destas diferentes estruturas, quando submetidas à acção de forças horizontais, elas vão ser classificadas em três grupos:

i) estruturas reticuladas
ii) estruturas parede
iii) estruturas mistas.

Os métodos correntemente adoptados no cálculo de edifícios referem-se a estruturas reticuladas e, em particular, a pórticos planos. Estuda-se, em seguida, como esses métodos podem ser

(*) Comunicação apresentada às II Jornadas Luso-Brasileiras de Engenharia Civil — Rio de Janeiro e S. Paulo, 1967.

generalizados para o estudo dos tipos de estruturas mencionados.

Mesmo no caso de edifícios com estrutura reticulada formando pórticos, é corrente que os diferentes pórticos paralelos não sejam todos iguais. Ora a deformabilidade dos pavimentos é, em geral, suficientemente pequena para impor compatibilidade dos deslocamentos de todos os nós dos pórticos ao nível dum mesmo andar. A consideração de que todos os nós, a um mesmo nível, se deslocam mantendo imutáveis as distâncias entre si (como pertencendo a um corpo rígido) impõe-se, portanto, como hipótese fundamental para obter uma melhor contrapartida na realidade dos resultados dos cálculos.

Sucede, também, por vezes, que ao nível dos andares não existem, pelo menos em certas direcções, vigas para exercerem a função de travessas dos pórticos e que essa função tem de ser cumprida pelas próprias lajes. É o caso de edifícios em que se utilizam pavimentos fungiformes, com ou sem capitéis aparentes, e dos edifícios sòmente vigados numa direcção. Estruturas deste tipo podem ainda ser assimiladas a pórticos mas há que convenientemente definir a rigidez de flexão das lajes funcionando como travessas dos pórticos.

No caso das travessas dos pórticos apresentarem rigidez muito superior à dos pilares, poderá ser lícito considerar não só que os nós dos pórticos mantêm a distância entre si, mas também que estão impedidos de rodar. Neste caso todos os pilares podem ser considerados como encastrados nas extremidades o que muito simplifica a análise.

Como se disse, em muitos casos as malhas dos pórticos são preenchidas por paredes cuja resistência não é desprezável. É, por exemplo, muito corrente o preenchimento das malhas dos pórticos por paredes de alvenaria de tijolo. Apesar de serem já numerosos os estudos relativos ao comportamento de estruturas com malhas preenchidas, ainda se não atingiu uma teorização satisfatória e é este um domínio de investigação com particular interesse.

Consideram-se como estruturas parede aquelas em que a função resistente é sòmente exercida por elementos planos — paredes e lajes — convenientemente interligados.

Para que estruturas deste tipo possam resistir a forças horizontais em qualquer direcção, é necessário que as paredes não sejam todas paralelas. Em geral estas estruturas são concebidas com paredes em duas direcções ortogonais.

O esquema fundamental para a análise destas estruturas consiste em considerar que cada parede constitui uma consola simples encastrada nas fundações e capaz de resistir a momentos flectores segundo um eixo normal ao seu plano. Um conjunto de paredes, segundo um mesmo alinhamento, interligadas entre si, constituirá uma consola complexa.

Estruturas deste tipo são por vezes constituídas por paredes de betão armado betonadas in-situ e por vezes por painéis préfabricados convenientemente interligados.

Finalmente, designam-se por estruturas mistas as estruturas obtidas pela associação de estruturas-parede e estruturas reticuladas.

É corrente utilizar os elementos de comunicação vertical, tais como caixas de escada e caixas de elevador, para com eles constituir núcleos resistentes, em estrutura-parede, e associar a esses núcleos estruturas reticuladas constituídas por lajes, vigas e pilares. Estruturas deste tipo adaptam-se particularmente bem a edifícios de grande altura, em que as comunicações verticais têm importância especial, e em que convém não atribuir totalmente aos pilares a função de resistência às forças horizontais, o que avolumaria as suas dimensões.

Compreende-se, pois, o interesse que tem o desenvolvimento de métodos de cálculo que permita uma análise suficientemente precisa do comportamento das estruturas mistas.

Razões arquitectónicas impõem muitas vezes a supressão quase completa das paredes a dados níveis, em geral, ao nível do terreno. Por vezes convém também que a esses níveis os elementos de suporte estejam mais distanciados do que nos níveis superiores. Tal implica a existência dum andar de transição. A possibilidade de análise de estruturas deste tipo é, pois, também importante.

2 — EDIFÍCIOS DE ESTRUTURA RETICULADA

O estudo dum edifício de estrutura reticulada poderia, em teoria, ser efectuado como uma estrutura no espaço considerando 6 graus de liberdade para cada nó (correspondendo a 3 translações e 3 rotações). Esta formulação, mesmo no caso de edifícios de dimensões correntes, condu-

ziria a um número elevadíssimo de equações lineares. Interessa pois substitui-la por uma análise que, sendo suficientemente precisa, seja praticável dentro dos meios de cálculo disponíveis.

A hipótese de que os pavimentos constituem planos de rigidez [2 e 3] permite condicionar as translações dos nós dos pórticos, impondo que os seus deslocamentos se processem sem alteração das distâncias horizontais entre si. Os deslocamentos horizontais dos nós dos pórticos em cada piso ficam portanto definidos por 3 variáveis que correspondem às duas componentes da translação e a uma componente de rotação do plano associado ao piso.

Além disso, a rigidez de torsão das vigas pode em geral ser desprezada quando comparada com a resistência de flexão. A estrutura no espaço pode assim ser substituída por um conjunto de pórticos planos cujos deslocamentos, ao nível dos andares estão sujeitos às condições referidas.

No caso particular da existência duma malha rectangular de vigas, esta esquematização implica que cada pilar seja separadamente considerado como pertencendo aos dois pórticos ortogonais que o contêm.

A resolução do problema estrutural formulado nestes termos pode efectuar-se utilizando o método dos deslocamentos.

Considere-se um edifício constituído por n pisos e decomponha-se a estrutura em m pórticos planos de modo que todos os pilares e vigas fiquem integrados nesses pórticos, fig. 1.

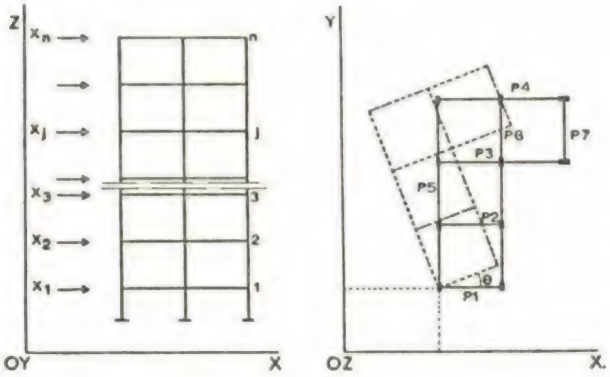


Fig. 1 — Edifício de estrutura reticulada

Seja $[K^i]$ a matriz de rigidez do pórtico i para deslocamentos horizontais unitários dos andares. A coluna α da matriz $[K^i]$ indica as forças horizontais de fixação que é necessário aplicar ao nível dos diferentes andares para que todos os pisos fiquem imóveis à excepção do piso α que deverá sofrer um deslocamento unitário. A matriz $[K^i]$ é da ordem n e os seus elementos representam vectores deslizantes, aplicados ao nível dos pisos e existentes no plano dos pórticos.

Defina-se um sistema de eixos coordenados x, y, z e considere-se, ao nível de cada piso, deslocamentos unitários segundo os eixos x e y e, bem assim, uma rotação unitária em torno do eixo o_z.

Sejam u_j, v_j e Θ_j as translações e a rotação relativas ao piso j e constitua-se com elas o vector

$$\{D^j\} = \begin{Bmatrix} u_j \\ v_j \\ \Theta_j \end{Bmatrix} \qquad (1)$$

Seja $\{D\}$ o vector que reúne os vectores $\{D^j\}$ correspondentes a todos os pisos:

$$\{D\} = \begin{Bmatrix} D^1 \\ D^2 \\ \vdots \\ D^n \end{Bmatrix} \qquad (2)$$

Designa-se por d^i_j o deslocamento, ao nível j, do pórtico i. Em virtude de este pórtico ser arrastado pelo deslocamento rígido global do pavimento, d^i_j é função linear de u_j, v_j e Θ. Tem-se pois:

$$d^i_j = \{a^i\}^T \{D^j\} \qquad (3)$$

Observa-se que o vector $\{a^i\}$ não depende do nível j, por se supor que o edifício apresenta em todos os níveis a mesma disposição de vigas e pilares.

A equação (3) pode ser considerada como exprimindo uma transformação de coordenadas relativa a cada um dos deslocamentos d^i_j, aos quais se referem as matrizes $[K^i]$.

A matriz de rigidez do pórtico i relativa às coordenadas u_j, v_j e Θ_j, $[K'^i]$ é obtida muito simplesmente multiplicando cada elemento K^i_{rs} da matriz $[K^i]$ por $\{a^i\}$ à esquerda e $\{a^i\}^T$ à direita; isto é:

$$[K'^i] = [K'^i_{rs}] = [\{a^i\} K^i_{rs} \{a^i\}^T] \qquad (4)$$

Para obter a matriz de rigidez do conjunto,

relativa aos deslocamentos u_j, v_j e θ_j, não há mais que somar as matrizes de rigidez de todos os pórticos relativas ao mesmo deslocamento:

$$[K] = \sum_i [K^i] \tag{5}$$

Os elementos do vector D (translações e rotações dos pisos) determinam-se pela resolução do sistema de equações:

$$[K]\ \{D\} = \{R\} \tag{6}$$

O vector $\{R\}$ é o vector dos componentes das resultantes e momentos (relativas ao eixo O Z) das forços exteriores actuantes em cada pavimento; isto é:

$$\{R\} = \begin{Bmatrix} R^1 \\ R^2 \\ \vdots \\ R^n \end{Bmatrix} \tag{7}$$

sendo

$$\{R^j = \begin{Bmatrix} X_j \\ Y_j \\ M_j \end{Bmatrix} \tag{8}$$

Determinados os elementos de $\{D\}$ e, portanto, os vectores $\{D^j\}$, calculam-se, por (3), os deslocamentos d^i_j. As forças horizontais que actuam no pórtico i podem ser obtidas por

$$\{F^i\} = [K^i]\ \{d^i\} \tag{9}$$

Nesta equação o vector $\{F^i\}$ contém as forças horizontais actuantes nos vários níveis do pórtico *i* e o vector $\{d^i\}$ os respectivos deslocamentos d^i_j.

A partir das forças $\{F^i\}$ é possível determinar os esforços nas barras pelo programa de análise de pórticos planos.

A formulação anterior simplifica-se muito no caso de estruturas simétricas sujeitas a sistemas de forças também simétricas. Se existe simetria em relação a dois eixos ortogonais, não há que considerar as rotações que correspondem a torsão da estrutura e os deslocamentos segundo as duas direcções principais podem ser estudados em separado.

A matriz rigidez de conjunto [K] é directamente obtida somando as matrizes correspondentes aos diferentes pórticos paralelos e os deslocamentos dos andares são, como anteriormente, dados por

$$\{D\} = [K]^{-1}\ \{R\}$$

em que $\{R\}$ é o sistema de forças horizontais considerado.

No caso da rigidez dos pavimentos ser muito superior à rigidez dos pilares, de tal modo que seja legítimo considerar estes como perfeitamente encastrados nas extremidades, os deslocamentos relativos entre pisos podem ser estudados independentemente da consideração dos deslocamentos dos pisos vizinhos. Em cada andar, a rigidez de cada pórtico, no seu plano, é definida por um número. A compatibilização dos deslocamentos relativos de cada andar implica, portanto, no caso geral, a resolução dum sistema de três equações.

No caso de haver simetria em relação a um eixo, a rigidez do conjunto é a soma das rigidezes dos diferentes pilares, $K = \Sigma K_i$ e sendo $\bar{F}_j = \sum_j^n F_j$ a resultante das forças aplicadas acima do andar j, o deslocamento do andar j em relação ao andar j — 1 será dada por

$$d_j = \frac{\bar{F}_j}{K}$$

Conhecido d_j, os esforços transversos em cada pilar, T^i_j, são dados por

$$T^i_j = d_j\ K_i$$

Com vista a tornar fàcilmente exequível o cálculo de estruturas reticuladas de edifícios, segundo as hipóteses anteriores, foi recentemente preparado, pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil, um programa de cálculo que completamente automatiza as equações matriciais anteriormente indicadas.

3 — EDIFÍCIOS DE ESTRUTURA-PAREDE

Nas estruturas-parede a capacidade de resistência a forças horizontais é obtida por consolas encastradas nas fundações. Atendendo à pequena rigidez transversal das consolas, para obter resistência de conjunto, é necessário que existam consolas em pelo menos duas direcções, em geral ortogonais.

Razões arquitectónicas impõem, correntemente, que as consolas não sejam consolas simples mas que nelas sejam praticadas aberturas. Por vezes, num mesmo plano, existem duas ou mais consolas, interligadas em geral ao nível dos pisos, constituindo o que se costuma designar por consolas complexas.

Os métodos de construção adoptados para a execução das paredes que constituem as consolas têm reflexos directos no seu comportamento. De facto as paredes podem ser betonadas no local, havendo então continuidade de todas as suas armaduras, ou préfabricadas.

As técnicas correntemente utilizadas para a interligação dos painéis préfabricados de paredes são muito variadas [4]. Assim, em alguns processos de construção as juntas verticais entre painéis contíguos são sòmente seladas por materiais de vedação, que não conferem qualquer resistência à junta. Neste caso, os pavimentos funcionam como chavetas, transmitindo os esforços transversos entre consolas vizinhas.

Noutros processos, procura-se dar continuidade às armaduras dos painéis, soldando os varões de painéis contíguos e betonando as juntas entre painéis.

Finalmente, noutros casos ainda, os painéis de parede são envolvidos por cintas, horizontais e verticais, nas quais é introduzida a quase totalidade da armadura necessária a assegurar o funcionamento da estrutura em conjunto.

O tipo de construção em que as juntas não são convenientemente seladas não vai ser analisado.

Estuda-se em primeiro lugar o comportamento das paredes no caso em que é lícito admitir homogeneidade. O caso de painéis envolvidos por cintas será referido em seguida.

Conforme se indica na fig. 2, para estudar a deformabilidade duma consola, há que considerar não só a deformabilidade por flexão, mas também as deformações devidas aos esforços transversos e aos deslocamentos da fundação. De facto, estas duas últimas parcelas são em geral pouco importantes para as estruturas reticuladas, mas o mesmo já não sucede nas estruturas-parede.

A deformabilidade de flexão é inversamente proporcional à rigidez EI, em que E é o módulo de elasticidade e I o momento de inércia da secção transversal da parede.

A deformabilidade devida aos esforços transversos é inversamente proporcional ao produto K G A em que K é o coeficiente de deformação por esforço transverso, função da geometria da secção transversal da parede e do coeficiente de Poisson, A a área da secção transversal e G o módulo de deslizamento. Para secções rectangulares este coeficiente é dado por $K = \frac{10(1+\nu)}{12+11\nu}$ em que ν é o coeficiente de Poisson [5]. Tomando $\nu = 0{,}2$, valor correntemente adoptado para o betão, vem $K = 0{,}845$.

Finalmente, os deslocamentos de fundação dependem da geometria desta e das características mecânicas do terreno [6 e 7]. Atendendo a que interessa analisar o comportamento do terreno para solicitações de curta duração, será, em primeira aproximação, lícito admitir que o comportamento é linear. Os deslocamentos da fundação serão definidos pelas suas duas componentes:

i) uma translação, d'_s, proporcional ao esforço transverso na base do edifício,
ii) uma rotação, φ, proporcional ao momento flector na base do edifício.

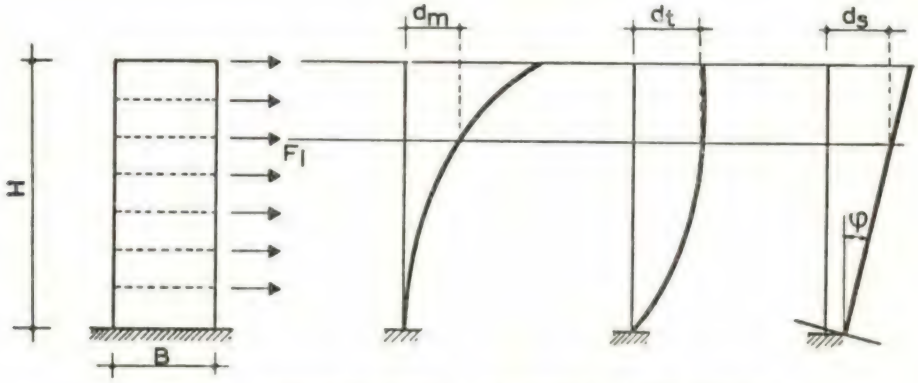


Fig. 2 — Parcelas relativas à deformação duma consola

A translação será dada por $d'_s = \frac{T}{C_z A}$

em que:

T — esforço transverso na base
A — área da base de fundação
C_z — coeficiente de corte elástico uniforme [6]

O deslocamento horizontal à cota h devido à rotação será

$$d''_s = \varphi h = \frac{M}{C_\varphi I} h$$

em que

M — momento na base devido às forças aplicadas
C_φ — coeficiente de compressão elástica não uniforme [6]
I — momento de inércia da área da secção em relação ao eixo de rotação

Os deslocamentos horizontais devidos à deformação do solo serão pois a soma $d_s = d'_s + d'_s$. Em geral, tem-se então os deslocamentos horizontais dos pontos da consola dados por

$$d = d_m + d_t + d_s$$

em que d_m e d_t são os deslocamentos devidos aos momentos flectores e aos esforços transversos anteriormente referidos.

A fig. 3 permite julgar a importância relativa dos deslocamentos de corte em relação aos de flexão, pois indica os valores da relação $\frac{d_t}{d_m}$ para diferentes valores da esbeltez da consola, sendo esta esbeltez definida pela relação $\frac{H}{B}$. Considerou-se uma consola de secção rectangular actuada por forças horizontais uniformemente distribuídas.

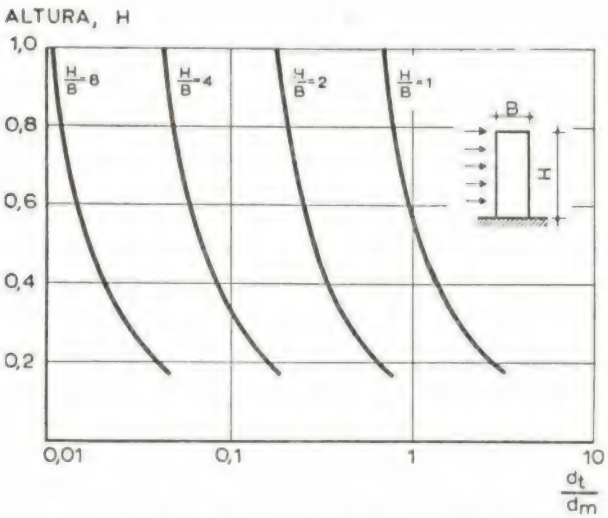


Fig. 3 — Relação entre os deslocamentos devidos ao corte e à flexão

No que se refere aos deslocamentos devidos à deformação do solo o seu valor pode, em situações correntes, igualar ou mesmo exceder os deslocamentos devidos à flexão. Neste caso é difícil efectuar uma comparação sistemática entre os deslocamentos de flexão e os devidos à deformação do solo, porque são muito numerosos os parâmetros postos em jogo.

Note-se que, em relação aos edifícios de estrutura-parede, se aplicam considerações análogas aos edifícios de estrutura reticulada, no que se refere aos vínculos impostos pela rigidez dos pisos. De facto, existindo várias consolas em planos vizinhos, as componentes horizontais dos deslocamentos das consolas, ao nível dos pisos, têm de ser compatíveis com um deslocamento de conjunto desses mesmos pisos.

Poderá, evidentemente, imaginar-se situações em que a deformabilidade relativa dos pisos e das consolas seja tal que a hipótese de indeformabilidade dos pisos deixe de ser razoável. Nos casos correntes tal não sucederá e tem ainda aplicabilidade para as estruturas-parede a mesma hipótese de compatibilidade de deslocamentos adoptada para as estruturas reticuladas. O programa anteriormente referido que permite compatibilizar a deformabilidade de vários pórticos pode ainda ser usado, não só no caso de existirem sòmente nos diferentes planos consolas, mas ainda no caso de estarem associadas em paralelo a pórticos. Há ùnicamente que tomar em atenção, como já se disse, que a deformabilidade das consolas seja convenientemente calculada, tomando em conta as diferentes parcelas que para ela contribuem significativamente.

No caso das consolas não serem rectangulares, mas terem aberturas ou formas complexas, tais peculiaridades têm de ser tomadas em consideração para o estudo da deformabilidade. Pode, para tal efeito, recorrer-se ao ensaio de modelos ou efectuar cálculos utilizando os programas de elasticidade plana, em particular o programa de cálculo à base de elementos finitos. Se as aber-

turas tiverem dimensões suficientemente grandes, o programa referido na alínea seguinte, relativo a estruturas mistas fornecerá também resultados plenamente satisfatórios. É esta, pode dizer-se, a situação corrente e considera-se que o referido programa será de grande utilidade para o estudo do problema em referência.

Em alguns trabalhos recentemente publicados [8 e 9] apresentam-se ábacos ou tabelas que permitem estudar os casos correntes de consolas interligadas por vigas de grande altura, fig. 4.

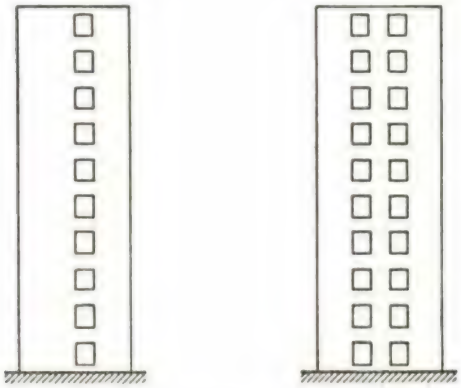


Fig. 4 — Tipos de consolas consideradas em tabelas existentes

O estudo da deformabilidade de paredes pré-fabricadas, em que os painéis estão envolvidos por cintas, tem dificuldades especiais. De facto, a rigidez do reticulado constituído pelas cintas, em relação à rigidez dos painéis, pode variar entre largos limites. O caso da rigidez das cintas ser muito grande em relação à rigidez dos painéis não tem correntemente contrapartida na pre-fabricação, mas corresponde antes ao caso de estruturas reticuladas com malhas preenchidas. O extremo oposto corresponde às paredes constituídas por painéis maciços de betão armado interligados por juntas muito deformáveis.

O estudo da deformabilidade de estruturas deste tipo pode ser efectuado recorrendo ao programa de elementos finitos, em elasticidade plana. Este programa adapta-se particularmente bem a este estudo porque é fácil variar as propriedades elásticas de elemento para elemento.

Apresenta-se na fig. 5 um exemplo da utilização deste programa ao caso duma estrutura de dois painéis envolvidos por cintas e em que o módulo de elasticidade das cintas é quádruplo do módulo de elasticidade dos painéis. Estudos actualmente em curso no Laboratório visam o estabelecimento de regras de cálculo simplificadas para o estudo de estruturas deste tipo. Dentre os estudos recentemente realizados neste domínio merecem especial referência os trabalhos de Polyakov [10] e Stafford Smith [11 e 12].

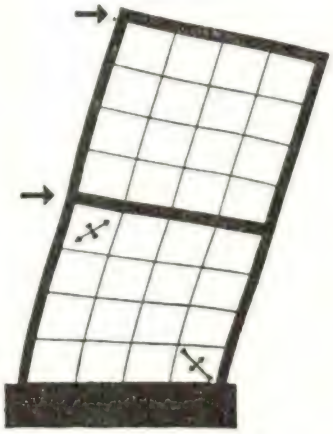


Fig. 5 — Deformada duma estrutura constituída por painéis envolvidos por cintas

4 — EDIFÍCIOS DE ESTRUTURA MISTA

Designam-se por estruturas mistas as estruturas em que se associam num mesmo reticulado, paredes, vigas e colunas, fig. 6, a). Como se disse, o caso particular de paredes com aberturas, fig. 6, b, pode ainda ser estudado adoptando hipóteses idênticas.

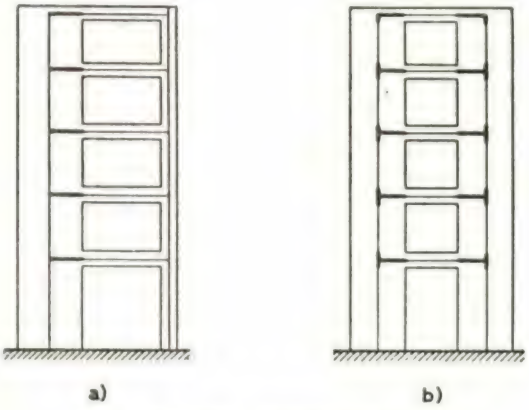


Fig. 6 — Tipos de estruturas mistas

Os métodos usuais de cálculo de estruturas reticuladas não podem ser directamente utilizados para o estudo de estruturas mistas. De facto, tal sòmente é possível desde que se tome em consideração a rigidez dos nós equiparando-os a blocos

rígidos. Esta consideração pode fazer-se supondo cada barra da estrutura fictícia equivalente constituída por troços extremos de rigidez infinita e um troço central com a rigidez da barra representada, fig. 7 [13]. O comprimento de cada troço rígido será igual à distância do eixo teórico do nó à face do bloco rígido em que o elemento em consideração encastra.

Como se sabe, desde que sòmente se considere a deformabilidade devida aos momentos flectores e esforços normais, as matrizes de rigidez duma barra, $\overline{a\,b}$, de acção constante, comprimento L, secção transversal de área A, e momento de inércia I, são dadas por

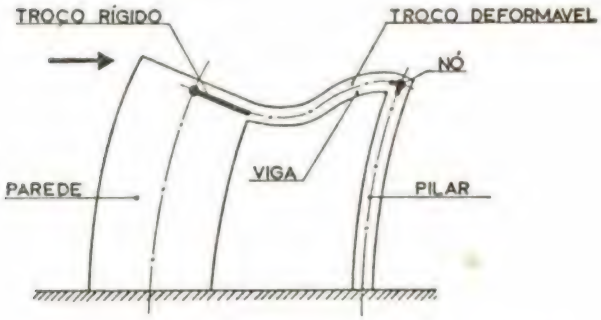


Fig. 7 — Esquema para cálculo de estruturas mistas

$$[K_{bb}] = \begin{bmatrix} \frac{E\,A}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12\,EI}{L^3} & \frac{-6\,EI}{L^2} \\ 0 & \frac{-6\,EI}{L^2} & \frac{4\,EI}{L} \end{bmatrix}$$

$$[K_{ba}] = \begin{bmatrix} \frac{-E\,A}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-12\,EI}{L} & \frac{6\,EI}{L^2} \\ 0 & \frac{-6\,EI}{L^2} & \frac{2\,EI}{L} \end{bmatrix}$$

em que $[K_{bb}]$ e $[K_{ba}]$ indicam, respectivamente, os esforços que se desenvolvem em b devidos a deslocamentos unitários aplicados em b e em a.

No caso de se pretender considerar não só a deformabilidade devida aos momentos flectores e esforços normais, mas também a deformabilidade devida a esforços transversos, basta considerar factores de correcção ϕ e ψ calculáveis a partir dum parâmetro α pelas expressões seguintes

$$\alpha = \frac{6\,EI}{L^2}\,\frac{1}{K\,G\,A}$$

$$\phi = \frac{1}{2\alpha + 1}\,,\ \psi = \frac{\alpha\,2 + 1}{2\alpha + 1} = (\alpha/2 + 1)\,\phi$$

em que G é o módulo de elasticidade transverssl, o qual deve ser devidamente corrigido para atender à forma da secção, como se indicou em 3.

Mediante a aplicação destes coeficientes a matriz $[K_{bb}]$ toma a forma seguinte:

$$[K_{bb}] = \begin{bmatrix} \frac{E\,A}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12\,EI}{L^3}\,\phi & \frac{-6\,EI}{L^2}\,\phi \\ 0 & \frac{-6\,EI}{L^2}\,\phi & \frac{4\,EI}{L}\,\phi \end{bmatrix}$$

Considere-se agora a barra $\overline{c\,d}$, constituída por um troço $\overline{c\,a}$ de rigidez infinita, um troço $\overline{a\,b}$ deformável, e de novo um troço $\overline{b\,d}$ de rigidez infinita (¹), fig. 8

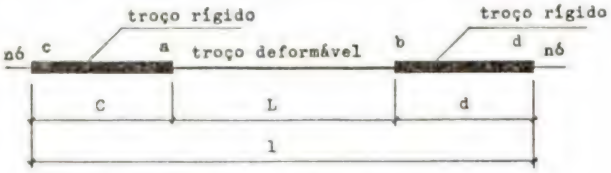


Fig. 8 — Elemento duma estrutura mista

A matriz $[K_{dd}]$, relativa à barra $\overline{c\,d}$, pode ser fàcilmente obtida de $[K_{bb}]$ mediante a transformação de coordenadas expressa pela matriz

$$[A] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & -d & 1 \end{bmatrix}$$

(¹) — A dedução que a seguir se apresenta foi estabelecida pelo Professor Stanley Hall, da Universidade de Nova Gales do Sul, Sidney, Austrália, quando do seu recente estágio no LNEC.

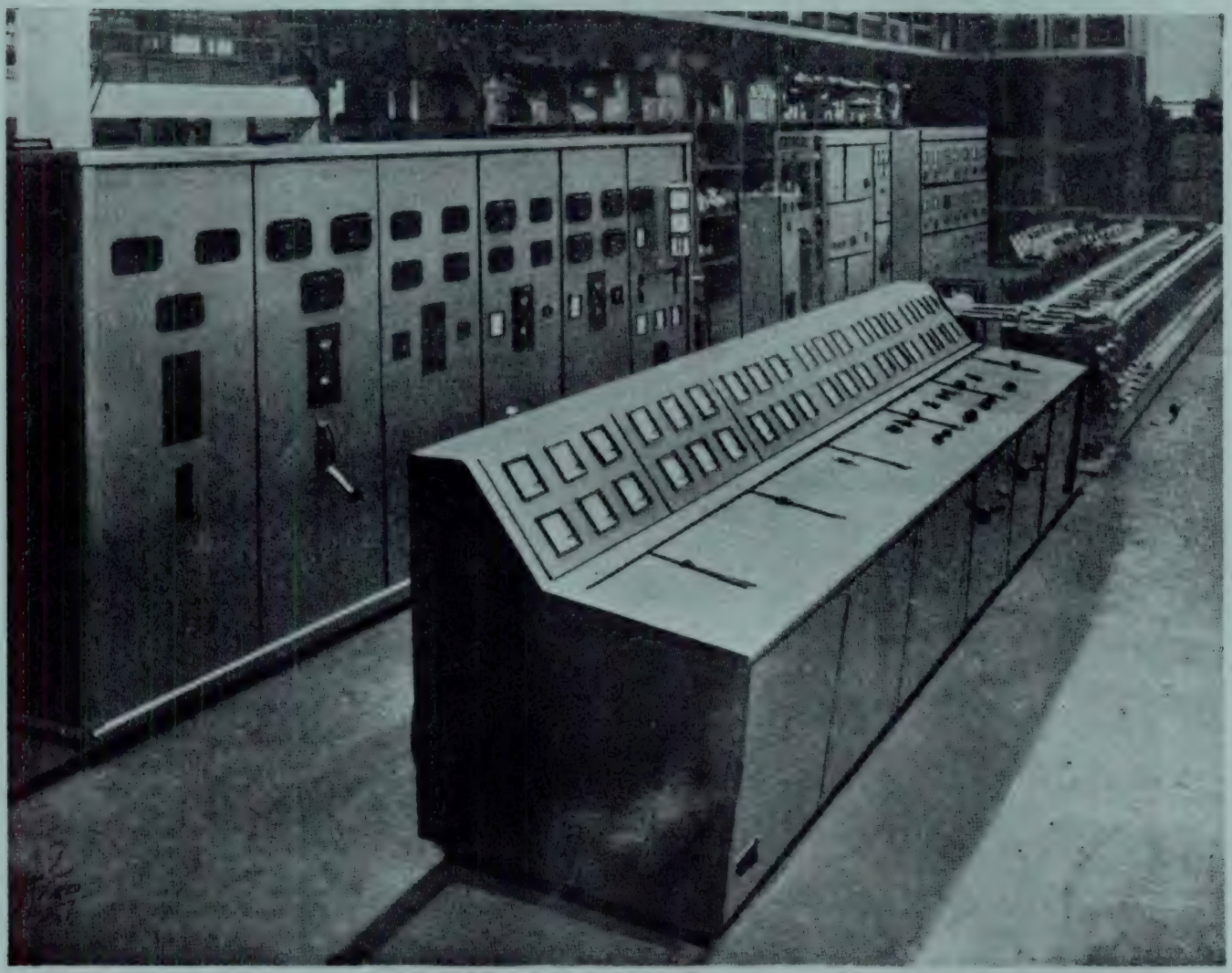
JAYME DA COSTA, L^DA

MECÂNICA E ELECTRICIDADE EM TODAS AS APLICAÇÕES

PORTO
Praça da Batalha, 12
Telef. 2 28 12 (PPC)

LISBOA
Rua dos Correeiros, 14
Telef. 32 70 35 (PPC)

LUANDA
Cx. Postal 5174
Telef. 4743



Material fabricado nas nossas oficinas, pronto para expedição

- Fabricação de aparelhagem eléctrica de alta e baixa tensão
- Equipamentos electromecânicos completos para centrais e fábricas
- Postos de transformação tipo monobloco
- Quadros blindados, capsulados e em armário
- Armaduras de iluminação de todos os tipos
- Contadores eléctricos e instrumentos de medida
- Telemedida e telecomando
- Instalações elevatórias de água
- Instalações de saneamento e esgotos
- Ferramentas de corte
- Motores Diesel industriais e marítimos
- Fogões eléctricos
- Frigoríficos
- Ventilação e condicionamento de ar
- Aparelhagem de Raios X e electromedicina

NAS GRANDES REALIZAÇÕES A

PHILIPS
ESTÁ SEMPRE PRESENTE

novo edifício do MINISTÉRIO DAS CORPORAÇÕES

SALA DAS SESSÕES
Int. de iluminação: 300 lux

GABINETE
Int. de iluminação: 400 lux

REFEITÓRIO
Int. de iluminação: 400 lux

PHILIPS
UMA ORGANIZAÇÃO MUNDIAL NO CAMPO DA LUMINOTECNIA

Arquitectos:
SERGIO GOMES
FREDERICO GEORGE

Projecto da instalação eléctrica:
LUÍS BANDEIRA, LDA.

Material de iluminação e som:
PHILIPS

DEPARTAMENTO DE ILUMINAÇÃO DA
PHILIPS PORTUGUESA, S. A. R. L.
RUA JOAQUIM ANTÓNIO DE AGUIAR, 66 - LISBOA • RUA FERNANDES TOMÁS, 760 - PORTO

Tem-se pois,

$$[K_{dd}] = [A]\,[K_{bb}]\,[A]^T$$

Efectuando os cálculos vem

$$[K_{bb}]\,[A]^T = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12\,EI}{L^3}\,\phi & \left(\frac{-12\,EI}{L^3}\,\phi\,d - \frac{6\,EI}{L^2}\,\phi\right) \\ 0 & \frac{-6\,EI}{L^2}\,\phi & \left(\frac{6\,EI}{L^2}\,\phi\,d + \frac{4\,EI}{L}\,\psi\right) \end{bmatrix}$$

$$[K_{dd}] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12\,EI}{L^3}\,\phi & \left(\frac{-12\,EI}{L^2}\,\phi\,d - \frac{6\,EI}{L^2}\,\phi\right) \\ 0 & \left(\frac{-12\,EI}{L^3}\,\phi\,d - \frac{6\,EI}{L^2}\,\phi\right) & \left(\frac{12\,EI}{L^3}\,\phi\,d^2 + \frac{12\,EI}{L^2}\,\phi\,d + \frac{4\,EI}{L}\,\psi\right) \end{bmatrix}$$

As quatro matrizes que definem completamente a rigidez da barra, podem ser expressas por uma hipermatriz

$$[K] = \begin{bmatrix} K_{cc} & K_{cd} \\ K_{dc} & K_{dd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H\,K_{dd}\,H^T & H\,K_{dd} \\ K_{dd}\,H^T & K_{dd} \end{bmatrix}$$

em que $[K_{dd}]$ tem a expressão anterior e a matriz $[H]$ é dada por

$$[H] = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & -l & -1 \end{bmatrix} \quad \text{em que } l = c + L + d$$

Efectuadas as operações matriciais e simplificando as expressões mediante a consideração dos parâmetros seguintes, vem:

$$\alpha = \frac{6\,EI}{L^2}\,\frac{1}{KGA} \qquad \phi = \frac{1}{2\,\alpha + 1}$$

$$\lambda_1 = 1 - \alpha \qquad \lambda_2 = 1 + \frac{\alpha}{2}$$

$$C_1 = 1 + 2\,\frac{c}{L} \qquad C_2 = 3\,\frac{c}{L}\left(1 + \frac{c}{L}\right)$$

$$B = 3\,\frac{c}{L}\left(1 + \frac{d}{L}\right) + 3\,\frac{d}{L}\left(1 + \frac{c}{L}\right)$$

$$D_1 = 1 + 2\,\frac{d}{L} \qquad D_2 = 3\,\frac{d}{L}\left(1 + \frac{d}{L}\right)$$

$$[K] = \left[\begin{array}{ccc|ccc} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12\,EI}{L^3}\,\phi & \frac{6\,EI}{L^2}\,\phi\,C_1 & 0 & \frac{-12\,EI}{L^2}\,\phi & \frac{6\,EI}{L}\,\phi\,D_1 \\ 0 & \frac{6\,EI}{L^2}\,\phi\,C_1 & \frac{4\,EI}{L}\,\phi\,(C_2 + \lambda_2) & 0 & \frac{-6\,EI}{L^2}\,\phi\,C_1 & \frac{2\,EI}{L}\,\phi\,(B + \lambda_1) \\ \hline -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-12\,EI}{L^3}\,\phi & \frac{-6\,EI}{L^2}\,\phi\,C_1 & 0 & \frac{12\,EI}{L^3}\,\phi & \frac{-6\,EI}{L}\,\phi\,D_1 \\ 0 & \frac{6\,EI}{L^2}\,\phi\,D_1 & \frac{2\,EI}{L}\,\phi\,(B + \lambda_1) & 0 & \frac{-6\,EI}{L^2}\,\phi\,D_1 & \frac{4\,EI}{L}\,\phi\,(D_2 + \lambda_2) \end{array}\right]$$

O programa de cálculo relativo a estruturas reticuladas planas com barras rectas de inércia constante (programa de cálculo n.º 2 do LNEC) foi adaptado de modo a formar a matriz rigidez das barras segundo a matriz anterior [1]. Para utilizar este programa basta acrescentar na folha de dados relativos às propriedades das barras os comprimentos dos troços c e d, considerados de rigidez infinita.

O esquema de cálculo que está na base do estudo de estruturas mistas consistiu em considerar os nós pontuais substituídos por blocos rígidos interligados por barras. Com vista a aperfeiçoar ainda mais este esquema, estão sendo efectuados estudos em que se utiliza o programa de elementos finitos em elasticidade plana para determinar a rigidez real dos nós em função das suas dimensões. A partir de tais estudos será possível relacionar os comprimentos dos troços rígidos extremos com as dimensões dos nós e obter, portanto, resultados ainda mais precisos, que permitirão não só a análise de estruturas mistas, mas também de estruturas-parede mesmo com aberturas de pequenas dimensões.

5 — EXEMPLO DE APLICAÇÃO A UM EDIFÍCIO DE ESTRUTURA MISTA

5.1 — Objectivo

Pretende-se determinar os esforços sísmicos num edifício com as dimensões indicadas na fig. 9 [14].

A estrutura é constituída por pórticos longitudinais e transversais, sendo os primeiros de maior rigidez. No sentido transversal ocorre uma caixa de escada constituída por duas paredes de betão armado com as dimensões de 0,20 × 4,00 m, conforme se indica na fig. 9.

Considera-se que a rigidez dos pisos é suficiente para igualar, a cada nível, os deslocamentos horizontais dos pórticos e paredes que formam a estrutura.

Analisa-se o comportamento do edifício sob a acção de forças horizontais aplicadas ao nível dos pisos.

[1] Esta adaptação foi efectuada pelo Professor Vicinius Filgueiras da Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil, durante o seu estágio no LNEC.

5.2 — Cargas actuantes

Cargas permanentes:

peso próprio das lajes	300	kg/m²
sobrecarga permanente	300	»
peso próprio das divisórias	200	»
	800	kg/m²

Forças sísmicas:

Para um coeficiente sísmico C = 0,15, as forças aplicadas ao nível de cada piso são:

— Pórtico A:

$F_1 = 6{,}9$ t	$F_6 = 5{,}6$ t
$F_2 = 6{,}4$ t	$F_7 = 5{,}6$ t
$F_3 = 6{,}4$ t	$F_8 = 5{,}6$ t
$F_4 = 6{,}4$ t	$F_9 = 5{,}6$ t
$F_5 = 6{,}0$ t	$F_{10} = 5{,}2$ t

— Pórtico C:

As forças sísmicas são sensìvelmente metade das anteriores.

— Pórtico B:

$F_1 = 6{,}9$ t	$F_6 = 5{,}7$ t
$F_2 = 6{,}2$ t	$F_7 = 5{,}7$ t
$F_3 = 6{,}2$ t	$F_8 = 5{,}7$ t
$F_4 = 6{,}2$ t	$F_9 = 5{,}7$ t
$F_5 = 5{,}9$ t	$F_{10} = 5{,}0$ t

5.3 — Análise da estrutura

Calcularam-se as deformações e os esforços devidos às acções sísmicas considerando várias hipóteses de funcionamento da estrutura, de modo a evidenciar as diferenças de comportamento entre os elementos estruturais isolados e o edifício em conjunto.

5.3.1 — Comportamento dos elementos estruturais supostos isolados

O diagrama dos momentos flectores do pórtico misto B, calculados pelo programa referido em 4., tem a forma indicada na fig. 10.

As forças aplicadas e os deslocamentos horizontais ao nível dos pisos nos pórticos A e B são as indicadas nas fig. 11 e 12, que evidenciam a grande diferença de deformabilidade entre os dois tipos de pórtico.

5.3.2 — Comportamento da estrutura em conjunto

Dada a grande disparidade de comportamento entre os dois tipos de pórtico que constituem a estrutura, evidenciada nas fig. 11 e 12, é de prever que a compatibilização dos deslocamentos horizontais ao nível dos pisos altere profundamente os esforços nos elementos considerados isolados.

Para o cálculo da estrutura em conjunto utilizou-se o programa referido em 2. No caso presente a simetria do edifício simplifica muito a análise, que é feita pelas seguintes fases:

— matriz deformabilidade dos elementos estruturais isolados, $[\Delta_A]$, $[\Delta_B]$ e $[\Delta_C]$

— matriz rigidez dos elementos estruturais isolados, $[K_A]$, $[K_B]$ e $[K_C]$, sendo $[K_i] = [\Delta_i]^{-1}$ $(i = A, B, C)$

— matriz rigidez da estrutura:

$$[K] = 2\{[K_A] + [K_B] + [K_C]\}$$

— matriz deformabilidade da estrutura:

$$[\Delta] = [K]^{-1}$$

— deslocamento ao nível dos pisos devidos à solicitação sísmica total $\{F\}$:

$$\{X\} = [\Delta]\{F\}$$

— forças horizontais $\{F_A\}$, $\{F_B\}$ e $\{F_C\}$ em cada pórtico correspondentes à deformada, dadas por:

$$\{F_i\} = [K_i]\{X\}$$

— esforços nos pórticos A, B, C, devidos à actuação das forças $\{F_i\}$

Os resultados do cálculo estão indicados nas figs. 13, 14 e 15, através das deformadas, solicitações e esforços finais nos pórticos.

Conforme se previa, a compatibilização de deslocamentos ao nível dos pisos altera profundamente as distribuições iniciais de solicitações e de esforços.

5.4 — Efeitos da deformabilidade das fundações

Dado que a distribuição de esforços depende fortemente das condições de apoio da caixa de escada, repetiu-se a análise do edifício considerando a caixa de escada apoiada sobre um meio elástico de características semelhantes às de um terreno argiloso de compacidade média.

As características das sapatas de fundação das paredes de betão são as seguintes:

— planta rectangular, com $5{,}00 \times 2{,}70$ m; área $A = 13{,}50$ m².

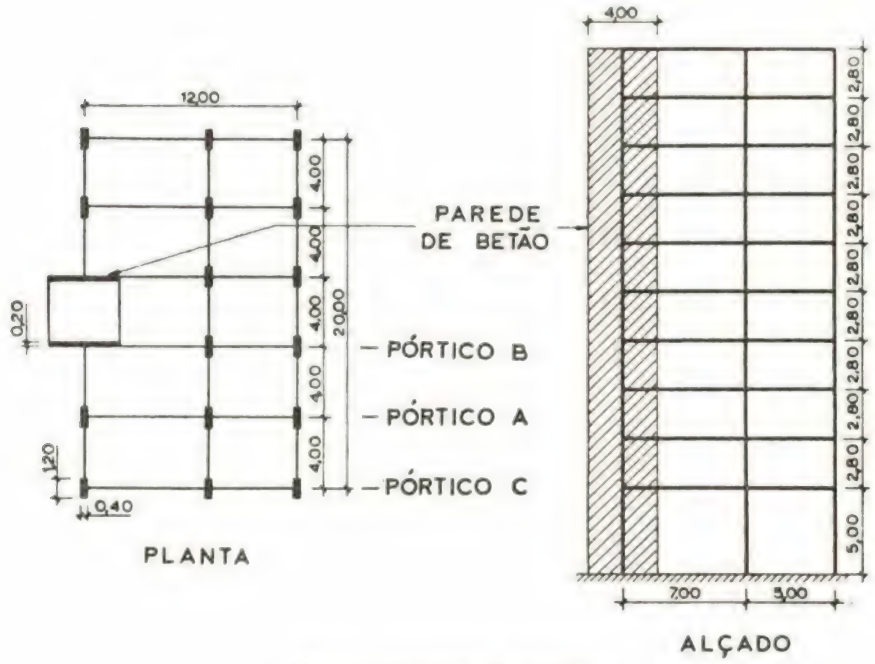


Fig. 9 — Estrutura do edifício

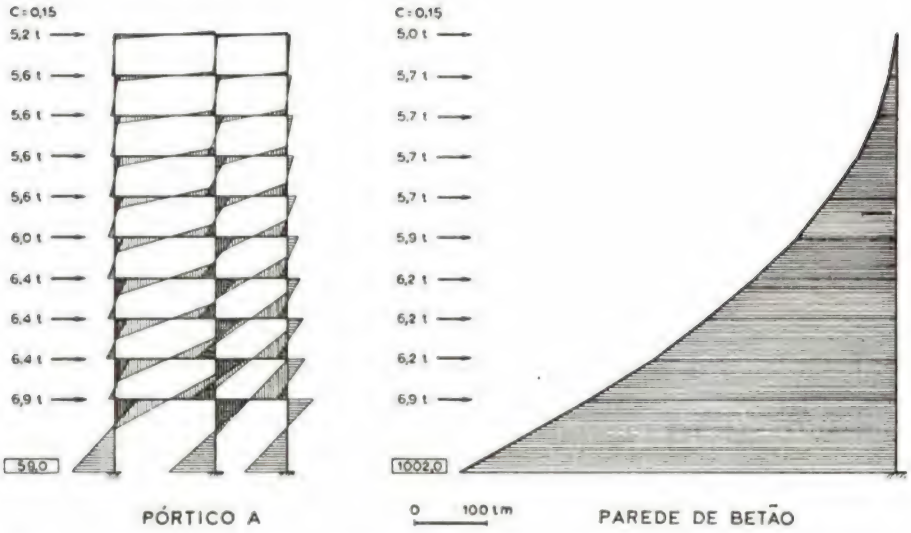


Fig. 10 — Momentos flectores no pórtico A e na parede de betão, supostos isolados

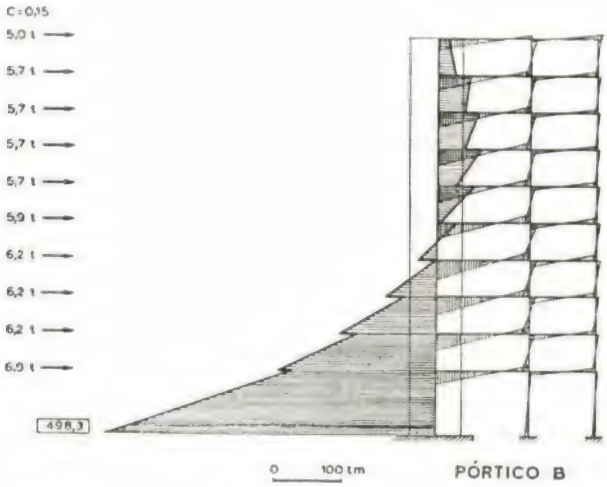
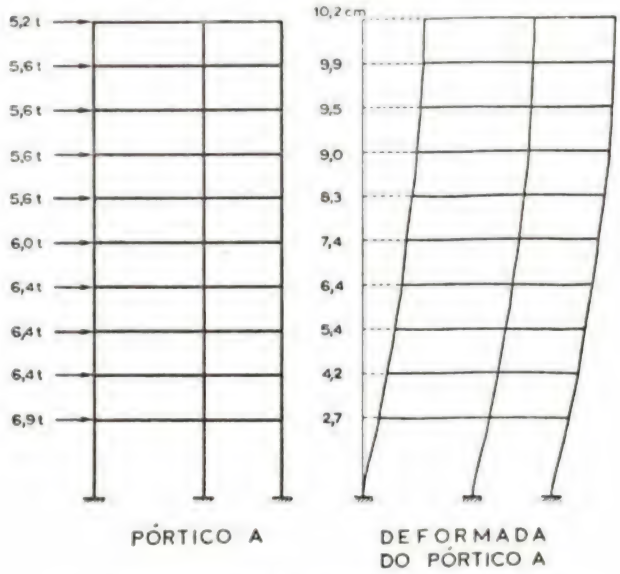


Fig. 11 — Momentos flectores no pórtico B (pórtico associado a parede de betão) suposto isolado



Fig, 12 — Deformada do pórtico A, uposto isolado

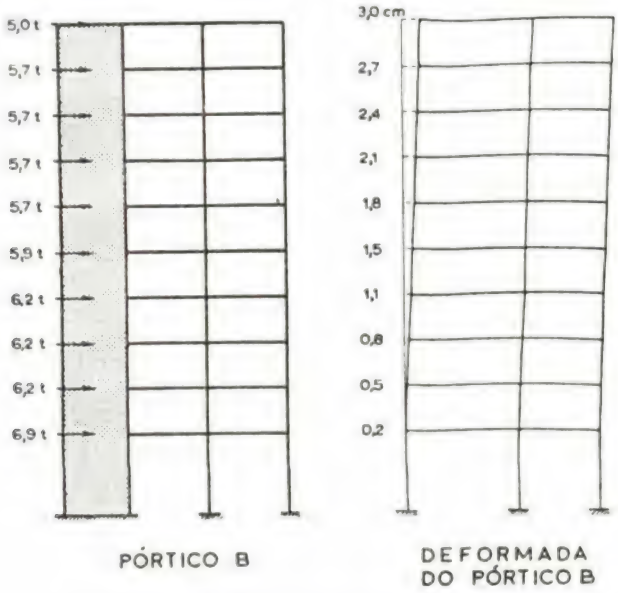


Fig 13 — Deformada do pórtico B, suposto isolado

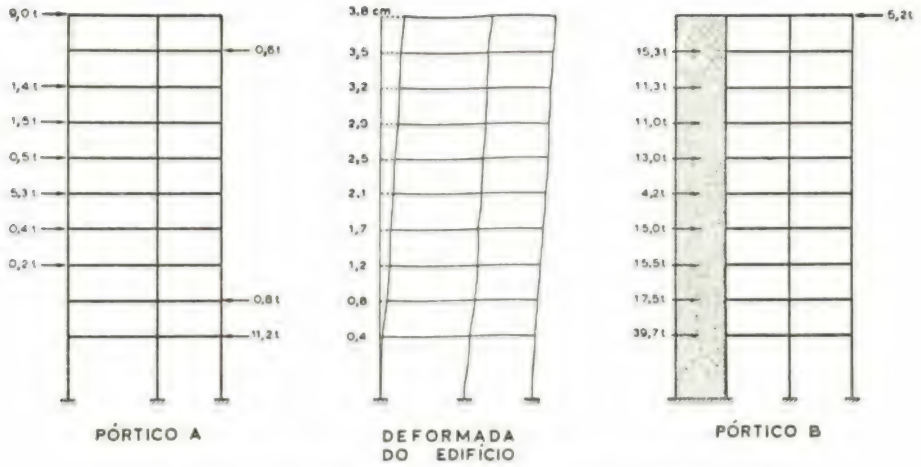


Fig. 14 — Deformada do edifício e forças sísmicas finais

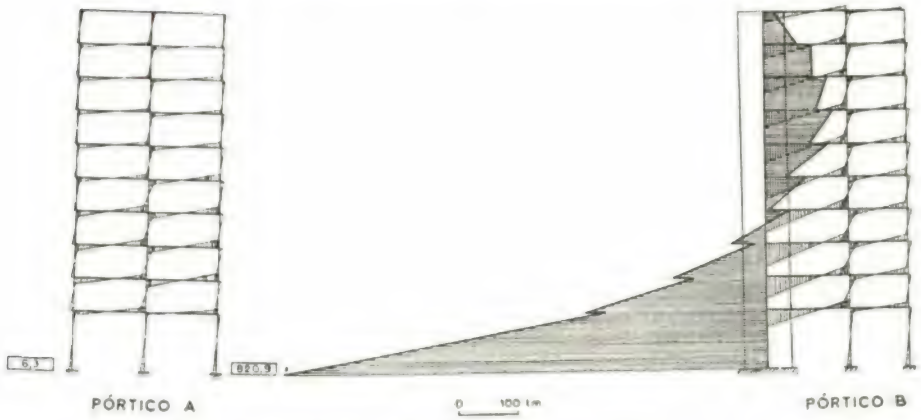


Fig. 15 — Momentos flectores finais nos pórticos A e B

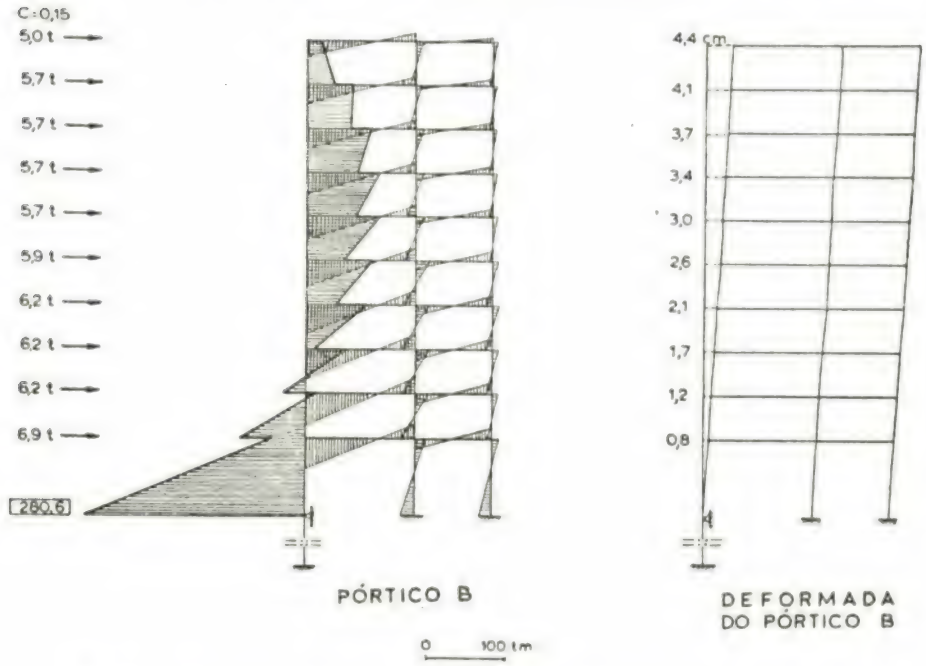


Fig. 16 — Momentos flectores e deformada do pórtico B, suposto isolado, considerando a deformabilidade do terreno

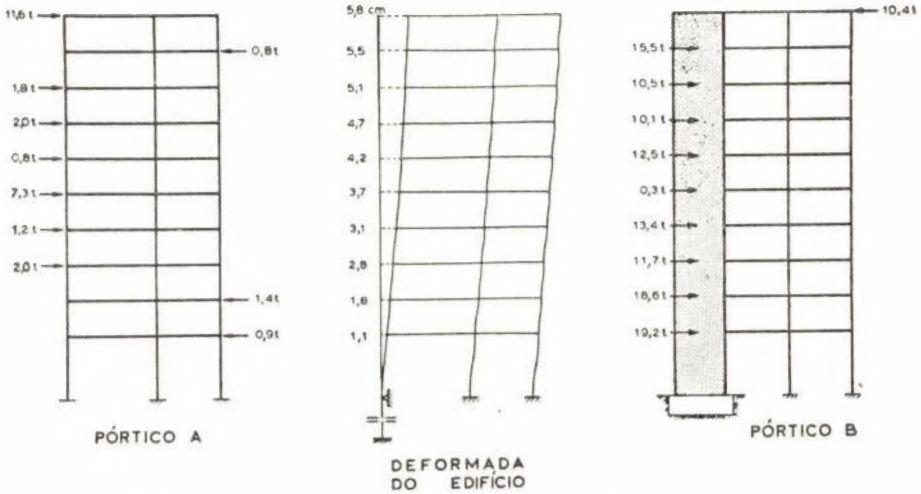


Fig. 17 — Deformada do edifício e forças sísmicas finais, considerando a deformabilidade do terreno

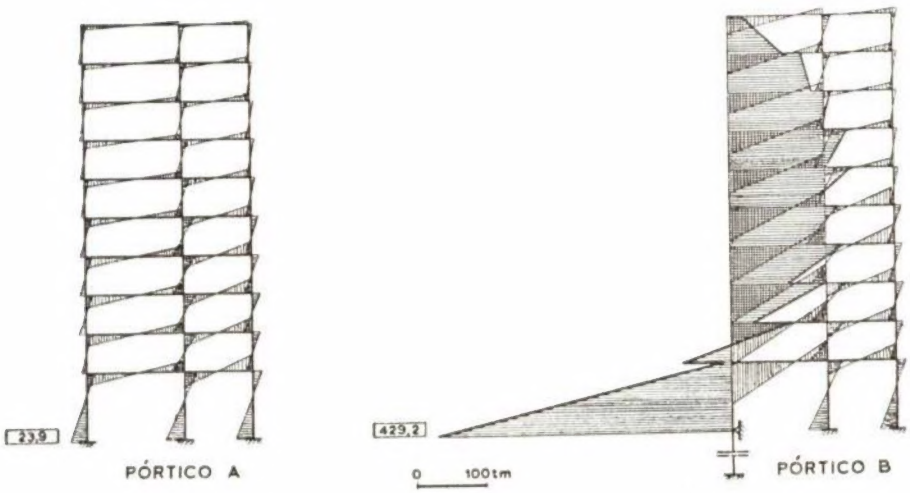


Fig. 18 — Momentos flectores finais nos pórticos A e B, considerando a deformabilidade do terreno

— momento de inércia axial: $I = 28{,}5\ m^4$.

Admitiu-se para características do terreno:

— capacidade de carga em regime estático: $\sigma_s = 2\ kg/cm^2$.
— coeficiente de compressão elástico uniforme: $C_u = 4\ kg\ cm^3$.
— coeficiente de compressão elástico não uniforme: $C_\varphi = 8\ kg/cm^3$.
— coeficiente de corte elástico uniforme: $C_\tau = 2\ kg/cm^3$.

O modelo estrutural correspondente à nova hipótese de apoio das paredes de betão é o indicado na fig. 16. A análise forneceu os resultados nas fig. 17, 18 e 19, pelas quais se verifica que a rotação da base da parede leva a uma diminuição considerável do momento flector nesta.

6 — CONCLUSÕES

As principais conclusões a evidenciar são as seguintes.

6.1 — A possibilidade de utilização dos computadores electrónicos permite uma análise de conjunto das estruturas de edifícios com boa contrapartida no comportamento real deste tipo de estruturas.

6.2 — A não compatibilização dos deslocamentos dos elementos estruturais, ao nível dos andares, pode conduzir a erros importantes. Em particular,

por efeito da assimetria na disposição de elementos rígidos e deformáveis, podem resultar esforços de torção elevados.

6.3 — O programa elaborado para o estudo de estruturas-parede e estruturas mistas tem grande generalidade e permite obter resultados muito precisos.

6.4 — Em edifícios altos, podem obter-se soluções de incontestável interesse económico mediante a associação de estruturas-parede e de estruturas reticuladas.

BIBLIOGRAFIA

1 — Schmidt, W. — High rise buildings of reinforced concrete construction What are the limitations. Journal of the American Concrete Institute, vol. 63, no 12, December 1966.

2 — Clough, R.; King, I — Analysis of three-dimensional building frames. Publication of the International Association for Bridge and Structural Engineering, vol. 24, Zürich, 1960.

3 — Clough, R; King, I.; Wilson, E. — Structural analysis of multistory buildings Journal of the Structural Division, A.S.C.E., ST3, June 1964.

4 — Comité Européen du Béton— Projet de recommandations pratiques unifiées pour le calcul et l'exécution de constructions par panneaux assemblés de grand format, Octobre, 1966.

5 — Cowper, G. R. — The shear coefficient in Timoshenko's beam theory. Journal of Applied Mechanics, ASME, June 1966.

6 — Barkan, D. — Dynamics of bases and foundations No Graw-Hill Inc., 1962.

7 — Symposium on vibration in civil engineering, London 1965. Butterworths, 1966.

8 — Albiges et Coulet – Contreventement des bâtiments, Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, Cahier 5, Paris 1960.

9 — Rosman, R. — Tables for the internal forces of pierced shear-walls subjected to lateral loads, Bauingenieur — Praxis H.66. Wilhelm und Sohn, Berlin, 1966.

10 — Polyakov — Some investigations of the problem of the strength of elements of buildings subjected to horizontal loads. Symposium on tall buildings, Southampton, 1966.

11 — Stafford-Smith, B. — Behaviour of square infilled frames, Journal of the Structural Division, A.S.C.E., ST1, Feb. 1966.

12 — Stafford-Smith, B. — The composite behaviour of infilled frames, Symposium on tall buildings. Southampton, 1966.

13 — Webster, J. A. — The static and dynamic analysis of orthogonal structures composed of shear walls and frames, Symposium on tall buildings, Southampton, 1966.

14 — Ferry Borges, J.; Ravara, A. — Seismic design of reinforced concrete buildings. First post-graduate course on earthquake engineering. International Center of Earthquake Engineering. Milano and Bergamo, 1967.

C. D. U. 621.311.5/91

ELEMENTOS SOBRE A PRODUÇÃO E O CONSUMO DE ENERGIA NA REDE ELÉCTRICA NACIONAL (*)

I — Breve nota mensal

No conjunto do sistema, as afluências do mês de Outubro totalizaram 196 GWh, a que corresponde uma probabilidade de serem excedidas da ordem dos 76 % e um coeficiente de produtibilidade de 0,66.

A energia acumulada no conjunto das albufeiras sofreu uma redução de 243 GWh situando-se no fim do mês em cerca de 829 GWh, valor correspondente a cerca de 39 % do enchimento máximo possível.

II — Elementos gerais (GWh)

	a) Mensais 1966	a) Mensais 1967	Variação %
Produção hidráulica (P_h) . . .	434,7	433,8	0
Produção térmica (P_t)	0,0	6,8	—
Produção total (P_T)	434,7	440,6	+ 1
Energia recebida de empresas não pertencentes ao RNC (E_r)	4,3	0,5	— 88
Exportações (Ex)	12,4	31,0	+ 150
Importações (I)	1,0	2,9	+ 190
Saldo importador (S_I)	— 11,4	— 28,1	— 146
Consumo em bombagem (C_b) .	0,0	0,0	0
Produção para consumos perman. (P_{cp})	370,4	404,1	(1) + 9,1
Produção para consumos não perman. (P_{cnp}) . . .	57,2	8,9	— 84
Total	427,6	413,0	— 3
Coeficiente de hidraulicidade	1,84	0,66	—

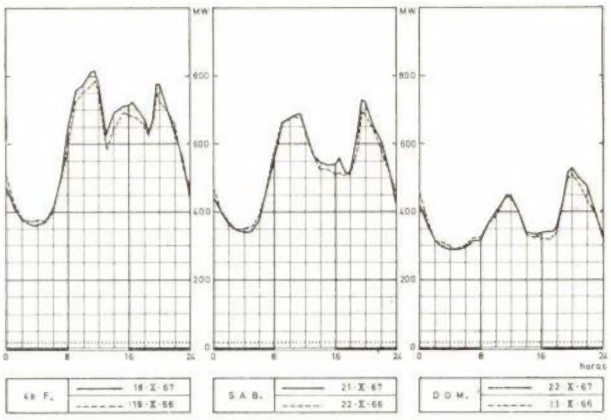
NOTA

(1) O aumento percentual da produção para consumos permanentes, tendo em conta a incidência dos domingos e dias especiais, é respectivamente de 8,4 e 10,2 %.

III — Diagramas de carga dos dias característicos

			4.ª feira: 1966	4.ª feira: 1967
Produção hidráulica		(P_h) MWh	15 074	16 125
Produção térmica		(P_t) MWh	0	0
Produção total		(P_T) MWh	15 074	16 125
Trocas com Espanha	Export.	(Ex) MWh	610	1 520
	Import.	(I) MWh	30	15
Consum em bomb. hidroel.		(C_b) MWh	0	0
Prod. para cons. perm.		(P_{cp}) MWh	12 981	14 270
Prod. para cons. não perm.		(P_{cnp}) MWh	1 513	350
TOTAL		$P_T + (I - Ex)$ MWh	14 494	14 620
Características dos diagramas	$P_T + (I-Ex)$	Potência máx. MW	789	816
		Potência mín. MW	376	362
		Utiliz. da ponta horas	18,4	17,9
		Factor de carga	0,77	0,75
	P_{cp}	Potência máx. MW	732	801
		Potência mín. MW	285	348
		Utiliz. da ponta horas	17,7	17,8
		Factor de carga	0,74	0,74

OUTUBRO



IV — Energia armazenada nas principais albufeiras

Albufeiras:	No fim do mês GWh	No fim do mês % (1)
Alto Rabagão	392,5	40,3
Paradela	71,2	32,0
Venda Nova	82,6	64,5
Salamonde	18,2	65,9
Caniçada	20,0	60
Vilar	0,0	0,0
Cabril	105,8	31,2
Castelo do Bode	98,7	60,6
Guilhofrei	2,6	31,3
Lagoa Comprida	11,0 (2)	26,9
Santa Luzia	23,4	38,0
Pracana	2,6	20,2
Póvoa	0,5 (3)	0,0
Total { com A. Rabagão . . .	829,1	39,2
Total { sem A. Rabagão . . .	436,6	38,3

NOTAS

(1) Coeficiente de enchimento em energia das albufeiras.

(2) Inclui 2,2 GWh armazenados em Vale do Rossim no início do mês e 1,6 GWh no fim do mês.

(3) Inclui 0,9 GWh armazenados no açude do Poio no início do mês e 0,5 GWh no fim do mês.

(*) *Elementos extraídos das estatísticas mensais do Repartidor Nacional de Cargas (R. N. C.). As produções e os consumos das empresas do R. N. C. representam cerca de 94 % dos totais do País.*

SIEMENS

A RECEPÇÃO DE PROGRAMAS DE RÁDIO E TELEVISÃO

para todos
os utentes de

um imóvel

uma vila

uma cidade

pode ser efectuada por
uma única antena Siemens.

Consulte-nos sobre a nossa técnica
de projecção, construção e montagem de

ANTENAS COLECTIVAS E URBANAS

SIEMENS-COMPANHIA DE ELECTRICIDADE, S.A.R.L.

LISBOA-1: AV. ALMIRANTE REIS, 65 — TEL. 53 69 21 • PORTO: RUA DAS CARMELITAS, 12 — TEL. 2 89 43